

THESE

Présentée devant

L'Université de La Rochelle
UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : GENIE CIVIL

École doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique (SI-MMEA)

Par

Oscar HERNANDEZ
Ingénieur en Génie Mécanique

ETUDE ET ANALYSE DE LA VENTILATION ET DE LA QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTERIEURS (QEI) DANS LES BÂTIMENTS DE BUREAUX A FAIBLE DEMANDE ENERGETIQUE LE CAS DE LA TOUR ELITHIS A DIJON

Directeur de thèse : Francis ALLARD

Soutenu le 25 septembre 2014 devant la Commission d'Examen composée de :

Mme	F. THELLIER	Professeur, Université de Toulouse, France	Rapporteur
M.	J.-J. ROUX	Professeur, INSA de Lyon, France, France	Rapporteur
Mme	M. MUSY	Ingénieure de Recherche, ENSA, France	Examineur
M.	C. ROZIER	Directeur R&D, Groupe ELITHIS, France	Examineur
M.	G. AYMOZ	Chef de service qualité de l'air (ADEME)	Examineur
M.	P. SALAGNAC	Professeur, Université de La Rochelle, France	Examineur
M.	F. ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle, France	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce au financement de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technique (ANRT) et du groupe Elithis, en collaboration avec le Laboratoire de Sciences pour l'Ingénieur et l'Environnement (LaSIE).

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux Directeurs de thèse, Francis ALLARD, responsable du LaSIE et Christian ROZIER, Directeur de la Recherche et Développement du groupe Elithis. Je suis très reconnaissant envers eux car ils ont partagé avec moi pendant ces quatre années, toutes leurs connaissances.

Ma gratitude va également à M Thierry BIEVRE, Directeur Général du Groupe Elithis qui m'a permis de réaliser ce travail au sein de son entreprise et qui m'a donné tous les moyens pour aboutir à ce résultat.

Je tiens aussi à associer à ces remerciements à tous les membres de l'Ademe Bourgogne, notamment à Didier CHATEAU et Lionel COMBET ainsi que l'équipe d'Aero Concept Engineering, en particulier Alexis LAPOUILLE et d'Atmosfair Bourgogne et sa Directrice Sandrine MONTEIRO, qui ont cru en mon travail et ont participé à son développement.

Mes remerciements vont également aussi à toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de manière indirecte de ce document car c'est grâce à eux que nous avons pu réaliser le suivi du confort du bâtiment Tour Elithis, L'ADEME Bourgogne, Elithis Groupe, le Cabinet Radiologue Imagerie Médicale Dijon et Bourgogne Énergie Solaire.

Je n'oublie pas Jennifer et Isabelle, Assistantes Administratives de l'école Doctorale, pour leur patience et leur messages de rappel qu'on aidé à ce que ce travail se passe dans le temps et dans l'ordre.

Je tiens à associer à ces remerciements, Françoise THELLIER, Professeur de l'Université de Toulouse et Jean-Jacques ROUX, Professeur de l'INSA de Lyon, qui ont expertisé ce travail de thèse en tant que rapporteurs et à tous les membres du Jury.

Je tiens aussi à remercier mon épouse Lorena sans ses conseils, sa patience, son amour je n'aurais pas pu aboutir à ce manuscrit.

Pour finir, je tiens à remercier à mes parents, Germán et Bertha malgré la distance ils ont su m'accompagner tout au long de la réalisation de ce travail. Ma sœur Angela, ma famille, Maria Eugenia, Carlos, Carlos Andrés, Oscar « el cuñis », Sergio « checho », Verónica « nena », Alain, Monique, Valérie, Laurent mes amis, Céline, Pierre, Delphine, Quentin, Mickael, Mathilde, Audry, Raphael, Rut, Manolo, Laurent, Victor, Eloi, Morgane, Ivan, Santiago, Adrien, Audrey et Aziza.

RESUME

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielles de Formation par la Recherche (CIFRE). Il a été financé par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) et le Groupe Elithis, bureau d'étude spécialisé dans le domaine de l'efficacité énergétique.

Le bâtiment représentant à lui seul plus de 40% de la demande énergétique en Europe et plus d'un tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES), un effort très important d'amélioration de l'efficacité énergétiques des bâtiment associé à une réduction drastique de leurs émissions de GES est aujourd'hui nécessaire. En ce sens, l'évolution des réglementations, tant européennes que nationales converge vers le développement à grande échelles de bâtiments neuf ou rénovés à très faible demande énergétique. Dans les stratégies de conditionnement des espaces intérieurs, la gestion optimisée de la ventilation occupe le premier poste. Outre le renouvellement d'air, la ventilation est en effet la plus ancienne et la plus utilisée des stratégies de contrôle de la qualité des environnements intérieurs (QEI).

Outre les aspects énergétiques, les travaux internationaux menés par l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2000) ou dans le cadre de projets européens coordonnés (European Collaborative Action Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure) (ECA, 2003) permettent d'affirmer aujourd'hui que la qualité de l'air est reconnue comme un enjeu réel de santé publique (ANSES, 2014).

Ainsi, pour traiter de la performance d'un système de ventilation, outre les aspects énergétiques et son efficacité à évacuer les polluants ou apporter de l'air neuf dans la zone d'occupation, il convient donc d'aborder le problème complet de la qualité des environnements intérieurs (QEI) intégrant dans sa définition la qualité de l'air intérieur (QAI) mais aussi le confort hygrothermique et visuel des occupants.

Nous avons réalisé tout un suivi expérimental de consommation énergétique, de confort thermique et de la qualité de l'air dans un bâtiment de bureaux à faible demande énergétique, la Tour Elithis. Nous avons observé que l'efficacité énergétique n'est pas toujours synonyme de confort et bonne qualité de l'air.

Nous avons donc construit un modèle numérique de ce bâtiment qui nous a permis de tester et analyser différences stratégies de fonctionnement. Nous avons utilisé différents critères de QEI qui nous ont permis de faire une analyse de la performance globale du bâtiment, pour conclure que le confort hygrothermique, visuel et la QAI peuvent être associés à une optimisation de la demande énergétique.

Mots-clés : Ventilation, qualité de l'air intérieur, qualité des environnements intérieurs, efficacité énergétique, modélisation, confort thermique.

ABSTRACT

This research work was carried out in conformity with the Industrial Convention of Training by Research (CIFRE). And was financed by the National Association of Research and Technology (ANRT) and the Elithis Group (Groupe Elithis), engineering and consulting firm specializing in the field of energy efficiency.

The building represents more than 40 % of the energy demand in Europe and more than a third of greenhouse gas emissions (GHG), an important effort to improve the energy efficiency of buildings associated have a drastic reduction in their green house gas emissions (GHG) is necessary today. In this sense, the evolution of the regulations, so Europeans as nationals converge on the development on a large scale new or renovated building with a very low energy demand. In the strategies of conditioning of the internal spaces, the optimized management of ventilation takes the first step. Besides the renewal of air, the ventilation is indeed the oldest and the most widely used strategies of Indoor Environmental Quality (IEQ).

Besides the energy aspects, the international work led by the World Health Organization (WHO, 2000) or within the framework of coordinated European projects (European Collaborative Action Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure) (ECA, 2003) claims today that the air quality is recognized as a real stake in public health (ANSES, 2014).

So, to deal with the performance of a ventilation system, besides the energy aspects and its efficiency to evacuate pollutants or to provide new air in the occupied zone, it is thus advisable to approach the complete problem of the Indoor Environmental Quality (IEQ) integrating into its definition the Indoor Air Quality (IAQ) but also the hydrothermal and visual comfort of the occupants.

We carried out a complete follow-up of energy consumption, thermal comfort and the air quality in an office building with low energy demand, the Tower Elithis. We observed that energy efficiency is not always synonymous with comfort and good air quality.

We thus created a digital model of this building, which allowed us to test and to analyze different strategies of function. We used various criteria of IEQ which allowed us to make an analysis of the global performance of the building, to conclude that the hydrothermal, visual comfort and the IAQ can be associated to an optimization of the energy demand.

Keywords: Ventilation, interior air quality, quality of the internal environments, energy efficiency, modelling, the thermal comfort.

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	13
LE CONTEXTE DES BÂTIMENTS A FAIBLE IMPACT ENERGETIQUE.....	13
1. CONTEXTE CLIMATIQUE.....	14
2. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE.....	15
2.1 LA DIRECTIVE EUROPÉENNE « ENERGY PERFORMANCE BUILDING DIRECTIVE » EPBD – DIRECTIVE 2002/91/EU	15
2.2 CONTEXTE FRANÇAIS	16
3. NOTION DE QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTERIEURS	17
CHAPITRE II.....	19
LA QUALITE DES ESPACES INTERIEURS (QEI)	19
1. LA NOTION DE QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTÉRIEURS	20
2. LES CRITERES DE CONFORT	20
2.1 LE CONFORT HYGROTHERMIQUE	21
2.1.1 LA MÉTHODE PROPOSÉE PAR FANGER (FANGER, 1973).....	21
2.1.2 LA MÉTHODE ADAPTATIVE.....	22
2.1.3 NOTION DE TEMPÉRATURE OPÉRATIVE	22
2.1.4 PLAGE DE VALEURS DU CONFORT THERMIQUE.....	23
2.2 LE CONFORT ET L’HUMIDITÉ RELATIVE	23
2.3 LE CONFORT VISUEL.....	24
2.3.1 LES NIVEAUX D’ÉCLAIREMENT	24
2.3.2 LE RISQUE D’ÉBLOUISSEMENT	25
2.4 LE CONFORT ACOUSTIQUE.....	25
2.5 QUALITÉ DE L’AIR.....	25
2.5.1 APPROCHE DU RENOUVELLEMENT D’AIR	26
2.5.2 APPROCHE SANITAIRE DE LA QAI – ÉLIMINATION DES POLLUANTS	27
2.5.2.1 POLLUTION INTÉRIEURE.....	27
2.5.2.2 POLLUTION EXTÉRIEURE SUR LA QAI.....	28
3. RELATION ENTRE PRODUCTIVITÉ ET BIEN-ÊTRE.....	30
3.1 TEMPÉRATURE ET PRODUCTIVITÉ.....	30
3.2 VENTILATION ET PERFORMANCE	31
4. ETUDE DE CAS –QUELQUES EXEMPLES DE BÂTIMENTS DE BUREAUX.....	33
4.1 THE BASLER VERSICHERUNG BUILDING – SUISSE	33
4.2.1 DESCRIPTION	33
4.2.2 PRINCIPE DE VENTILATION.....	33
4.2.3 STRATÉGIE DE RÉGULATION	34
4.2.4 SUIVI DU BÂTIMENT.....	34
4.2.5 RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	34
4.2 IVEG. INTERCOMMUNALE DE DISTRIBUTION D’ÉLECTRICITÉ ET DE GAZ.	35
4.2.1 DESCRIPTION	35
4.2.2 PRINCIPE DE VENTILATION.....	35
4.2.3 STRATÉGIE DE RÉGULATION	36
4.2.4 SUIVI DU BÂTIMENT.....	36
4.2.5 RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	36
4.3 RIJKSWATERSTAAT.	37
4.3.1 DESCRIPTION	37
4.3.2 PRINCIPE DE VENTILATION.....	37
4.3.3 STRATÉGIE DE RÉGULATION	38
4.3.4 SUIVI DU BÂTIMENT.....	38
4.3.5 RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	38
4.4 NREL, NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY.....	39
4.4.1 DESCRIPTION	39

4.4.2	PRINCIPE DE VENTILATION.....	40
4.4.3	STRATÉGIE DE RÉGULATION.....	41
4.4.4	SUIVI DU BÂTIMENT.....	41
4.4.5	RÉSULTATS ET CONCLUSIONS.....	42
4.5	ARAS CHILL DARA BUILDING.....	42
4.5.1	DESCRIPTION.....	42
4.5.2	PRINCIPE DE VENTILATION.....	43
4.5.3	STRATÉGIE DE VENTILATION.....	43
4.5.4	SUIVI DU BÂTIMENT.....	44
4.5.5	RÉSULTATS ET CONCLUSIONS.....	44
5.	LES CERTIFICATIONS ENVIRONNEMENTALES ET LA QEI.....	45
5.1	CERTIFICATION ENVIRONNEMENTALE LEED (USGBC, 2014).....	45
5.2	CERTIFICATION ENVIRONNEMENTALE BREEAM (BREEAM, 2014).....	45
5.3	LA CERTIFICATION HQE.....	46
5.4	COMPARATIF ENTRE CERTIFICATIONS.....	46
6.	CONCLUSION.....	48
	CHAPITRE III.....	49
	LA TOUR ELITHIS, PRESENTATION ET SUIVI EXPERIMENTAL.....	49
1.	DESCRIPTION GÉNÉRALE.....	50
1.1	LES SYSTÈMES DE VENTILATION.....	51
1.2	LE SYSTÈME DE CHAUFFAGE.....	54
1.3	LE SYSTÈME DE RAFRAICHISSEMENT – PÉRIODE ESTIVALE.....	55
1.4	LE SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE.....	56
1.5	LE BOUCLIER THERMIQUE.....	57
1.6	LA PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE.....	58
2.	BILAN ENERGÉTIQUE DE LA TOUR ELITHIS.....	59
2.1	BILAN DES USAGES RÉGLEMENTAIRES EN ÉNERGIE PRIMAIRE.....	59
2.2	BILAN TOTALE EN ÉNERGIE PRIMAIRE.....	59
2.3	DISCUSSION DE RÉSULTATS.....	60
2.4	BILAN DU BÂTIMENT EN ÉNERGIE FINAL.....	60
3.	EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE RESSENTI.....	61
3.1	PÉRIODE HIVERNALE.....	61
3.1.1	BILAN PÉRIODE HIVERNALE.....	63
3.1.1	BILAN CONFORT THERMIQUE.....	67
3.1.2	RÔLE DE L'HUMIDITÉ.....	69
3.1.3	QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR RESSENTIE.....	71
3.1.4	ÉCLAIREMENT.....	72
3.1.5	ACOUSTIQUE.....	72
3.1.6	QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR.....	73
3.1.7	CONCLUSION.....	73
3.2	PÉRIODE ESTIVALE.....	74
3.2.1	BILAN PÉRIODE ESTIVALE.....	75
3.2.2	BILAN DU CONFORT THERMIQUE.....	78
3.2.3	BILAN DE L'HUMIDITÉ.....	79
3.2.4	QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR RESSENTIE.....	80
3.2.5	ÉCLAIREMENT.....	81
3.2.6	ACOUSTIQUE.....	82
3.2.7	QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR.....	82
3.3	CONCLUSIONS.....	83
4.	ETUDES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR.....	84
4.1	MÉTROLOGIE ET MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE.....	84
4.1.1	ANALYSE DE L'AIR EXTÉRIEUR (ATMOSF'AIR BOURGOGNE).....	84
4.1.2	ANALYSE DES ÉMISSIONS DE MATÉRIAUX (ASPA).....	86
4.1.3	ANALYSE DE L'AIR INTÉRIEUR – LASIE.....	86

4.2	RÉSULTATS SUIVI ATMOSF'AIR	89
4.2.1	AIR EXTÉRIEUR.....	89
4.2.2	RÉSULTATS AIR INTÉRIEUR.....	89
4.2.3	SYNTHÈSE.....	90
4.3	RÉSULTATS ANALYSES LASIE - COMPOSÉS ORGANIQUE VOLATILES (COV) ET ALDÉHYDES	90
4.3.1	SYNTHÈSE.....	93
4.4	RÉSULTATS ASPA – ÉMISSIONS DES MATÉRIAUX.....	93
4.5	CONCLUSION	95
5.	CONCLUSION	96
	CHAPITRE IV.	97
	PRESENTATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DU BÂTIMENT POUR L'ANALYSE DE LA QEI	97
1.	INTRODUCTION DE L'OUTIL – ENERGYPLUS	98
1.1	INTERFACE.....	99
1.2	PÉRIODE D'ANALYSE	99
2.	PRESENTATION DU MODELE	99
2.1	MODÈLE 3D	99
2.1.1	ZONAGE THERMIQUE	99
2.1.2	QUARTIER	101
2.1.3	LE BOUCLIER THERMIQUE	101
2.2	SAISIE DU MODÈLE SUR ENERGYPLUS	102
2.2.1	OCCUPATION	102
2.2.2	MODÉLISATION DE L'ÉCLAIRAGE.....	104
2.2.3	MODÉLISATION DES ÉQUIPEMENTS BUREAUTIQUES.....	104
2.2.4	MODÉLISATION DES INFILTRATIONS	106
2.2.4.1	RÉSULTATS DU TEST D'ÉTANCHÉITÉ.....	106
2.2.4.2	RÉSULTATS OBTENUS PAR LA MÉTHODE DE DÉCROISSANCE DE LA CONCENTRATION EN CO ₂	106
2.2.5	MODÉLISATION DE LA VENTILATION	108
2.1.4	MODÉLISATION DU CHAUFFAGE ET DU RA Fraîchissement.....	110
2.1.5	MODÉLISATION DU BOUCLIER THERMIQUE	110
2.3	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES.....	111
2.3.1	HIVER.....	112
2.3.2	ÉTÉ	113
3.	MODELES UTILISES	114
3.1	PROFIL DU TERRAIN	114
3.2	DISTRIBUTION SOLAIRE.....	114
3.3	TRANSFERT DE CHALEUR SURFACIQUE	114
3.4	BILAN THERMIQUE	115
3.5	BILAN THERMIQUE DE L'AIR.....	116
3.6	CONFORT THERMIQUE	117
3.7	QUALITÉ DE L'AIR.....	118
3.7.1	PROPOSITION DE MÉTHODE POUR L'ANALYSE DE LA CONCENTRATION DE FORMALDÉHYDE	119
4.	RESULTATS ET ANALYSES DE LA MODELISATION	120
4.1	DEMANDE ÉNERGÉTIQUE – SEMAINE HIVER.....	120
4.2	DEMANDE ÉNERGÉTIQUE – SEMAINE ÉTÉ	121
4.3	TEMPÉRATURES INTÉRIEURES	121
4.4	QUALITÉ DE L'AIR.....	123
4.5	CONFORT THERMIQUE	123
4.6	CONCLUSION	125
	CHAPITRE V.	127
	ETUDE NUMÉRIQUE DE STRATÉGIES POUR L'AMÉLIORATION DE LA QEI DANS LES BÂTIMENTS DE BUREAUX À FAIBLE DEMANDE ÉNERGÉTIQUE	127
1.	LES INDICATEURS DE PERFORMANCE.....	128
1.1	QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR	128

1.2	CONFINEMENT (QUALITÉ DU RENOUVELLEMENT D'AIR)	128
1.3	CONFORT HYGROTHERMIQUE	129
1.4	CONFORT VISUEL	129
1.5	EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	129
2.	LES STRATEGIES DE PERFORMANCE DANS UN BÂTIMENT TERTIAIRE DE BUREAUX.....	130
3.	PRESENTATION DU MODELE D'ETUDE	131
3.1	FACTEURS QUI INFLUENT LA PERFORMANCE DU BÂTIMENT	131
3.1.1	LE QUARTIER	131
3.1.2	LE BOUCLIER	132
3.1.3	INFILTRATION	133
3.1.4	SONDE DE CALCUL DE L'ÉCLAIREMENT	134
3.2	MODÈLE D'ÉTUDE	134
4.	ANALYSE DU MODÈLE DE REFERENCE – INDICATEURS DE PERFORMANCE	135
4.1	ANALYSE DE MODÈLE DE RÉFÉRENCE	135
4.2	DEMANDE ÉNERGÉTIQUE	140
4.3	CONCLUSION	140
5.	ANALYSE DES STRATEGIES D'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE	141
5.1	VITRAGE	141
5.2	VENTILATION	143
5.2.1	RECYCLAGE	143
5.2.2	VENTILATION TOUT AIR NEUF 7-19H	146
5.2.3	VENTILATION 5-19H	149
5.2.4	VENTILATION NOCTURNE	151
5.2.5	MODULATION DE DÉBITS	153
5.2.6	VENTILATION NATURELLE	155
5.3	PROTECTIONS SOLAIRES.....	158
5.3.1	BRISES SOLEIL ORIENTABLES (BSO).....	158
5.3.2	VITRAGE ÉLECTROCHROME	161
5.4	INFLUENCE DE L'INERTIE (MASSE – MCP)	164
5.4.1	MCP	164
5.4.1.1	MCP SUR VENTILATION NOCTURNE	166
5.4.2	INFLUENCE DE L'INERTIE (MASSE – BÉTON).....	167
5.4.3	BÉTON + SUR VENTILATION NOCTURNE	169
5.5	ENVELOPPE DU BÂTIMENT	170
5.5.1	DOUBLE PEAU	170
5.5.1.1	CAS HIVER	171
5.5.1.2	CAS ÉTÉ	172
5.5.2	LE MUR CAPTEUR (MUR TROMBE-MICHEL)	174
5.5.2.1	CAS HIVER	174
5.5.2.2	CAS ÉTÉ	175
5.5.3	LE MUR TROMBE-MICHEL ACTIF	177
5.5.3.1	CAS HIVER	177
5.5.4	FENÊTRE PARIÉTODYNAMIQUE	180
5.5.4.1	CAS HIVER	180
5.5.4.2	CAS ÉTÉ	181
6.	SYNTHESE	183
6.1	VITRAGE	183
6.2	VENTILATION	183
6.3	PROTECTIONS SOLAIRES.....	184
6.4	INERTIE.....	184
6.5	ENVELOPPE.....	185
7.	CONCLUSION	186
	CONCLUSION GENERALE.....	187
	PERSPECTIVES.....	189

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	191
ANNEXES	197
1. ANNEXE 1 - ENQUÊTE CONFORT THERMIQUE – PERIODE HIVER	197
2. ANNEXE 2 - ENQUÊTE CONFORT THERMIQUE – PÉRIODE HIVER	199
3. ANNEXE 3 – DÉTAIL VARIANTE 1 - VITRAGE	201
4. ANNEXE 6 – DÉTAIL VARIANTE 4 – VENTILATION 5-19H	202
5. ANNEXE 7 – DÉTAIL VARIANTE 5 – VENTILATION NOCTURNE.....	203
6. ANNEXE 8 – DÉTAIL VARIANTE 6 – MODULATION DES DÉBITS	204
7. ANNEXE 9 – DÉTAIL VARIANTE 7 – VENTILATION NATURELLE	205
8. ANNEXE 10 – DÉTAIL VARIANTE 8 – BRISES SOLEIL ORIENTABLES	206
9. ANNEXE 12 – DÉTAIL VARIANTE 10 – INERTIE.....	207
10. ANNEXE – 13 – DÉTAIL VARIANTE 13 – DOUBLE PEAU.....	207
11. ANNEXE 14 – DÉTAIL VARIANTE 14 – MUR TROMBE	208
12. ANNEXE 15 – DÉTAIL VARIANTE 15 – MUR TROMBE ACTIF.....	209
13. ANNEXE 16 – DÉTAIL VARIANTE 16 – FENÊTRE PARIETODYNAMIQUE	209

NOMENCLATURE

A	Surface mur	[m ²]
C, Co	concentration dans le domaine respectivement aux instants t et t ₀	[μg/m ³]
C _i	concentration intérieur en polluant	[μg/m ³]
C _E	concentration extérieur en polluant	[μg/m ³]
C _N	concentration normalisé de CO ₂	[ppm]
C _p	coefficient de pression du vent	[-]
C _p	Capacité thermique massique	[J kg/K]
DGI	Daylight Glare Index	[-]
Ed	pertes de chaleur par diffusion de vapeur à travers la peau	[W]
E _{sw}	pertes de chaleur dues à la transpiration	[W]
E _{re}	pertes de chaleur latentes dues à la respiration	[W]
f _{convected}	Apport de chaleur par l'éclairage	[W]
F _{surf}	facteur de forme	[-]
h _{ExhaustInlet}	Enthalpie de l'air extrait de la zone	[kJ/kg]
HR _{min}	Enthalpie calculée à humidité constante	[kJ/kg]
h	Coefficient d'échange	[W/m ² K]
H	métabolisme	[W]
HR	Humidité relative de l'air	[%]
h _{rad}	Coefficient d'échange par rayonnement	[W m ² /K]
L _s	luminance	[cd/m ²]
L _b	luminance moyenne du fond	[cd/m ²]
L	pertes de chaleur sèches dues à la respiration	[W]
m _{Supply}	Débit massique fourni à la zone	[kg/s]
h _{SupplyOutlet}	Enthalpie de l'air fournie à la zone	[kJ/kg]
Q _{total}	énergie totale fournie à la zone	[J]
Q _{sensible}	énergie sensible fournie à la zone	[J]
Q _{latent}	énergie latente fournie à la zone	[J]
R	pertes de chaleur par échange radiatif du corps habillé	
t _a	température de l'air	[°C]
t _{rm}	température radiante moyenne	[°C]
t _{op}	température opérative	[°C]
T _r	température radiative	[°C]
T _{surf}	température de surface	[°C]
V _{met}	Vitesse de vent mesurée par la station météo	[-]
V _Z	Vitesse de vent à une hauteur déterminée	[m/s]
Z	Altitude	[m]

Z_{met}	Hauteur à la quelle se trouve la capteur	[m]
------------------	--	-----

SYMBOLES GRECQUES

ω	Taille angulaire de la source vue par l'œil	[str]
Ω	Angle solide défini par la position de l'œil	[str]
α	Coefficient en fonction du profil de la vitesse de vent	[-]
δ	Coefficient en fonction de l'épaisseur de la couche	[-]
α_{met}	Coefficient du profil de vitesse	[-]
δ_{met}	Coefficient pour l'épaisseur de la couche	[-]

ABREVIATIONS

COV	Composés organiques volatils
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
QAI	Qualité de l'Air Intérieur
QEI	Qualité des Environnements Intérieurs
DF	Double Flux
SF	Simple Flux
VentNat	Ventilation Naturelle
DOE	Department of Energy
EMPD	Effective Moisture Penetration Depth
HAMT	Combined Heat and Moisture Transfer

INTRODUCTION GENERALE.

LE CONTEXTE DES BÂTIMENTS A FAIBLE IMPACT ENERGETIQUE

Entre 1880 et 2012, le changement climatique a eu comme conséquence une augmentation de la température moyenne de la Terre d'environ 0,85°C (GIEC, 2013). D'après les prévisions, si ce rythme continue la température s'élèvera de 3°C en moyenne d'ici à 2100. Afin de limiter ce scénario, les émissions de gaz à effet de serre doivent diminuer d'environ 10% par décennie. Or, en France, le bâtiment y contribue à hauteur de 20%. Ainsi les réglementations thermiques évoluent-elles constamment pour diminuer la dépendance énergétique et lutter contre le changement climatique. La problématique autour de l'énergie est de plus en plus maîtrisée au niveau du chauffage. En revanche, le réchauffement climatique et la sur-isolation des bâtiments provoquent, en période estivale, l'augmentation des températures à l'intérieur des bâtiments et par conséquent une demande croissante de systèmes de climatisation.

Lorsqu'un bâtiment de bureaux est réalisé, l'objectif principal est d'accueillir une population spécifique dans des espaces répondant à leurs besoins. Les futurs utilisateurs y passeront environ 30% de leur temps. La qualité de ces espaces devient ainsi un enjeu majeur (Wargocki, 2003). Améliorer la qualité peut représenter un réel intérêt économique pour les employeurs. En France, le coût de l'absentéisme dans le secteur privé s'est élevé à 16 milliards d'euros en 2012. 59% de ce coût est lié à un mauvais état de santé des employés représentant environ 9 milliards d'euros.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les problématiques liées au contexte climatique qui orientent les politiques et la réglementation vers des bâtiments à « zéro énergie » et/ou à « énergie positive », puis nous allons introduire la problématique de la Qualité des Environnements Intérieures (QEI).

1. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le changement climatique fait référence à la modification de tendances climatiques causée par :

- Des phénomènes naturels
- Des activités humaines.

Dans le passé, le climat de la terre a été affecté par des facteurs naturels tels que des variations de la production solaire et la projection de cendres volcaniques. La planète a connu de nombreuses périodes de refroidissement et de réchauffement. La dernière grande période de refroidissement s'est terminée il y a environ 10 000 ans (Gouvernement de Canada, 2008). Il existe donc bien un processus naturel de modification des températures, mais l'activité humaine est en train de l'accélérer en augmentant l'effet de serre dus aux gaz émis. Réduire les émissions de gaz à effet de serre est donc indispensable pour limiter ce réchauffement. Avec la signature du protocole de Kyoto, les engagements pris par les différents pays de l'Union Européenne ont permis de diminuer ces émissions. La figure 1 présente cette évolution (MEDDE, 2014) :

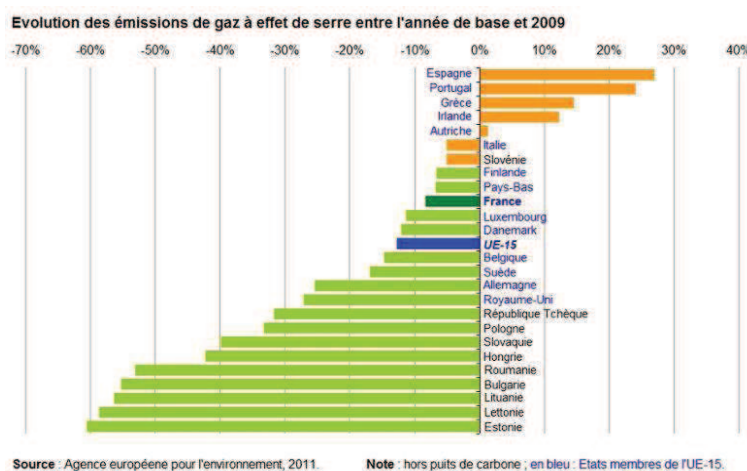


Figure 1. Évolution des émissions annuelles de CO₂

Pour le cas français, cette diminution se traduit par la mise en place de différents programmes stratégiques : subventions pour les travaux d'isolation des bâtiments, primes pour l'achat de voitures moins polluantes, etc. (MEDDE, 2014). En revanche, en observant plus en détail cette diminution, nous pouvons constater que l'engagement a été respecté pour 5 des 6 gaz à effet de serre. Seuls les HFC (hydrofluorocarbures) présentent une augmentation considérable. La figure 2 montre cette évolution (CITEPA, 2012) :

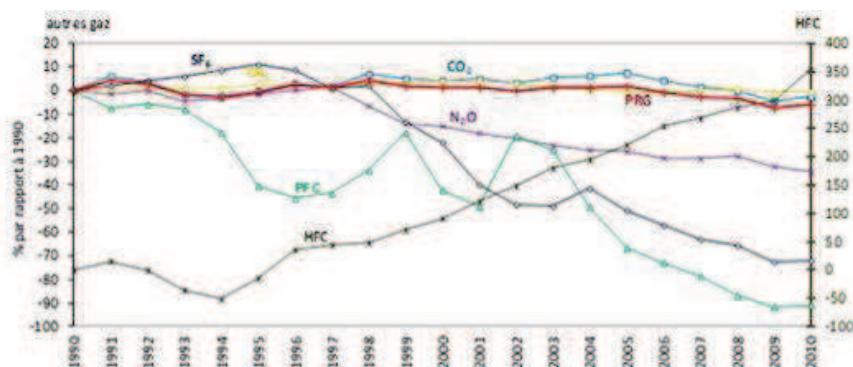


Figure 2. Émissions totales de 6 gaz à effet de serre en France en 2009

Les HFC sont produits principalement dans l'industrie de la réfrigération, les aérosols et les mousses isolantes, activités liées à l'industrie du bâtiment. Or, comme évoqué lors de l'introduction de ce chapitre, la demande en climatisation de bâtiments neufs ou rénovés est en constante augmentation. Les systèmes de climatisation présents sur le marché nécessitent des HFC pour leur fonctionnement. Ces derniers ont un impact très élevé sur le réchauffement climatique. La figure 3 montre le pouvoir de réchauffement global par type de gaz : nous observons que les HFC et PFC (Perfluorocarbures) ont l'indice le plus important (GIEC, 2013).

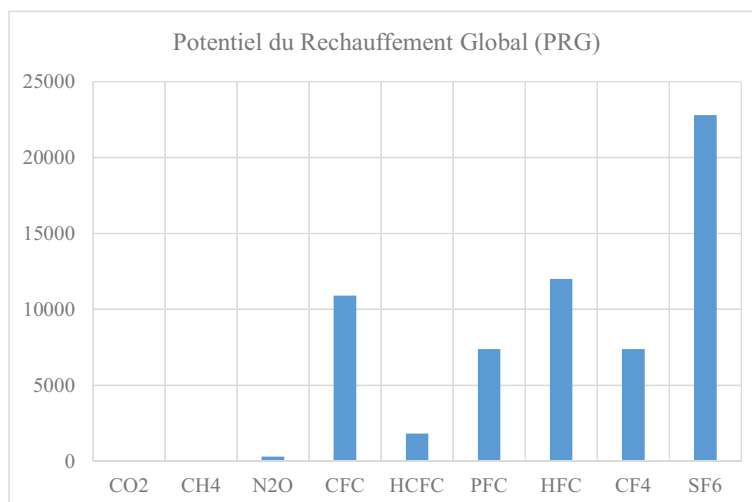


Figure 3. Potentiel de Réchauffement Global (PRG) des gaz à effet de serre

C'est la raison pour laquelle, la fabrication des CFC (chlorofluorocarbures) et des HCFC (hydrochlorofluorocarbures) a été interdite en 1995. En revanche, les HFC et PFC utilisés comme substituts, restent une problématique car leur indicateur PRG reste très important.

Pour atteindre l'objectif de réduction de GES de 10%, un effort considérable doit être fait, d'une part car les émissions de CO₂ sont constantes et d'autre part car les HFC sont très utilisés notamment dans l'industrie de la climatisation pour le bâtiment.

2. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE

Les politiques énergétiques au niveau Européen et Français, notamment la Directive Européenne EPBD 2010/31, établissent les critères, permettant d'atteindre les objectifs du protocole de Kyoto et de réduire la dépendance énergétique.

2.1 La directive Européenne « ENERGY PERFORMANCE BUILDING DIRECTIVE » EPBD – Directive 2002/91/EU

Un élément clé de cette législation est l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments (directive 2002/91/CE, la directive EPBD). Elle exige de tous les pays membres de l'Union Européenne d'améliorer leurs réglementations concernant la construction et d'introduire la certification énergétique des bâtiments. Cette directive comporte 17 articles (EPBD, 2002).

En France, cette directive s'est traduite par l'introduction des certificats de performance appelés « Diagnostic de Performance Énergétique DPE » (figure 4). Le DPE a été mis en place en 2005 et permet de faire un diagnostic des bâtiments neufs ou anciens afin de donner un classement énergétique vis-à-vis de sa consommation et de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) :

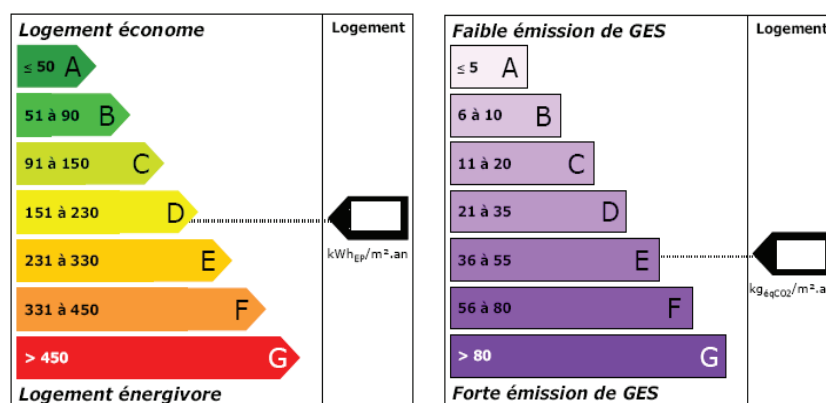


Figure 4. Etiquettes énergétiques - DPE

En Mai 2010, une deuxième version de cette directive a été votée et adoptée par les 29 pays signataires (UE + la Norvège et la Croatie). Cette mise à jour (ECEEE, 2010) du 31 décembre 2010 cible tous les bâtiments neufs dans l'UE. Elle introduit la notion de « Nearly Zero Energy Buildings » (NZEB) qui doit être mise en œuvre partout en

Europe au 1^{er} Janvier 2020 : tous les bâtiments neufs à partir de 2020 devront compenser leur consommation d'énergie par une source de production d'énergie locale et renouvelable. Les autorités publiques devront donner l'exemple, tout comme les propriétaires ou locataires, en mettant en œuvre les bâtiments (NZEB) à partir du 1er Janvier 2018.

2.2 Contexte Français

La figure 5 montre le poids que représente chaque secteur d'activité en France vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre. En les classant du plus pollueur ou moins pollueur, on trouve en premier lieu les transports, en deuxième l'agriculture et en troisième l'industrie. Le bâtiment occupe la quatrième place avec environ 20%, auquel il faut ajouter 40% des gaz à effet de serre dus à la production d'énergie qui est utilisée par le secteur du bâtiment. Au total, le secteur du bâtiment représente ainsi environ 25 % des émissions de gaz à effet de serre, ce qui le situe au niveau du transport.

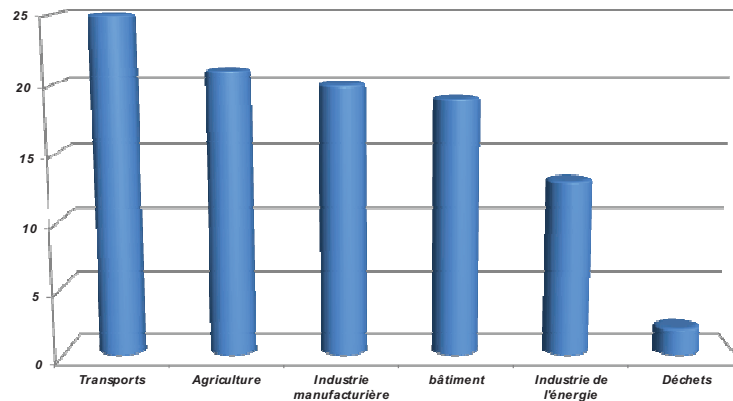


Figure 5. Émissions de gaz à effet de serre par secteur - ADEME

En termes de consommation, dans la figure 6, nous pouvons observer que le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le plus énergivore.

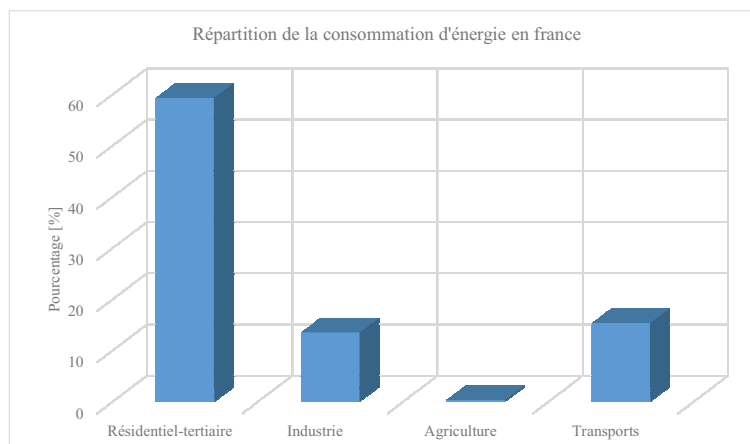


Figure 6. Répartition de la consommation d'énergie en France (MEDDE, 2011)

Le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie mais en termes d'émissions de GES, il n'est que 4^{ème}. En 1975 suite au premier choc pétrolier (1973), une première réglementation thermique pour les bâtiments a été adoptée, avec pour objectif de diminuer la dépendance énergétique. Elle ne s'appliquait qu'aux bâtiments neufs d'habitation imposant une isolation des parois et une régulation de systèmes de chauffage. En 1988, une deuxième version apparaît (RT 1988) pour les bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels (bureaux). La troisième version de cette réglementation thermique date de 2000 (RT 2000) ; elle s'appliquait de la même manière aux bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels mais avec une nouveauté, la consommation devait être inférieure de 20 % pour les bâtiments résidentiels et de 40 % pour les bâtiments non résidentiels par rapport à la RT 1988. Le 1er septembre 2006, la RT 2005 a remplacé la RT 2000. Cette mise à jour demandait une amélioration de 15 % de la performance thermique pour tous les bâtiments neufs. Aujourd'hui, la RT 2012 se présente comme une évolution de la RT 2005 qui intègre la bonne conception architecturale (bioclimatique) du bâtiment. La figure 7 présente l'évolution des réglementations thermiques :

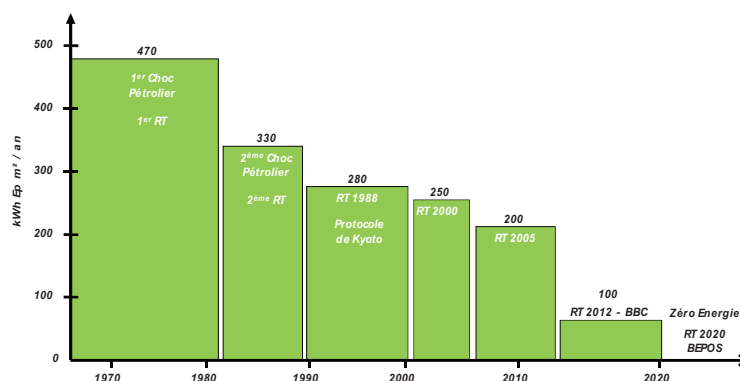


Figure 7. Évolution de la réglementation - Elithis Groupe

Un effort considérable a été fait pour la réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment. Depuis l'apparition de la RT (1970), la consommation énergétique a été divisée par 4. Nous pouvons constater que les pouvoirs publics ont pris conscience de la problématique liée au réchauffement climatique et à la dépendance énergétique et la mise en place de cette réglementation a permis une diminution considérable de la consommation énergétique. Pour 2020, l'objectif sera que tous les bâtiments neufs soient à énergie positive, nous nous intéressons donc à ces types de bâtiments.

3. NOTION DE QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTERIEURS

Un effort considérable a été réalisé pour améliorer la performance énergétique des bâtiments. La réglementation thermique se focalise sur la performance énergétique des bâtiments, elle fournit simplement une consommation de référence. Or, un bâtiment ne doit pas se caractériser par un niveau de consommation mais par un ensemble des critères de confort. Nous retrouvons ici, la température, l'humidité, la lumière, le bruit, l'odeur. La combinaison des critères de confort et des critères énergétiques définit ce que nous appelons la Qualité des environnements intérieurs.

Quand nous parlons du confort nous faisons référence au bien-être des occupants, la performance au travail ou la réalisation de quelque tâche commence à diminuer, la productivité baisse, cela peut avoir des conséquences pour un employeur en termes économiques, risque d'absentéisme et pour la personne car sa santé est en jeu. Dans la performance au travail nous retrouvons quatre facteurs, social, organisationnel, privé et environnemental, la figure 8 résume ces facteurs (Clements-Croome, 2000) :



Figure 8. Facteurs qui influencent la performance au travail

Notre travail se focalise sur le facteur **Environnement** qui fait référence aux espaces intérieurs et la qualité dont ils ont été conçus et/ou gérés (QEI). Garantir les bonnes conditions de travail peut être bénéfique pour l'entreprise (Wargocki, 2006) (Wyon, 1996).

La figure 9 présente la répartition des coûts de construction et d'opération d'un bâtiment par rapport aux salaires, le coût total d'opération et construction d'un bâtiment n'est représenté que de 10% du coût global, le coût de la

masse salarial représente 80% du total, cela voudrait dire que la moindre perte de productivité aura un impact considérable.

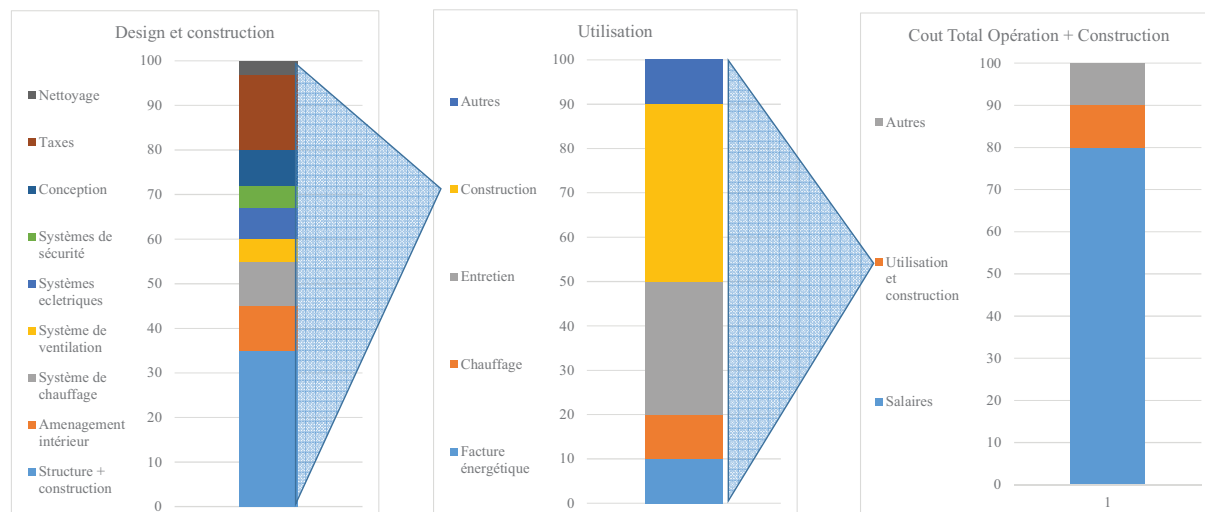


Figure 9. Décomposition de dépenses de fonctionnement dans un immeuble de bureaux (REHVA N°6)

Aux Etats-Unis, le bénéfice économique engendré par une meilleure QEI a été estimé entre 29 à 168 milliards de dollars (USD) par an et la réduction de l'absentéisme peut générer jusqu'à 400 USD par an d'économie. En Europe, cette économie a été estimée à 330 € par employé par an (Wargocki, et al., 2006). La bonne conception des Espaces Intérieurs c'est un enjeu majeur.

Nous avons introduit la problématique autour des bâtiments. L'évolution des réglementations en matière de la performance énergétique est due principalement au changement climatique. Des efforts considérables ont été faits pour réduire la demande énergétique des bâtiments, notamment avec la mise en place de la RT. D'un point de vue de la QEI, peu d'efforts ont été faits. Pourtant, la QEI peut avoir un impact économique.

La QEI doit être étudiée de la même manière que l'aspect énergétique, actuellement, le traitement qui est donné reste une option, c'est le cas des certifications environnementales. Il est important d'intégrer cette définition de manière systématique dans chaque bâtiment, de la même manière que la RT fait avec l'efficacité énergétique.

Nous nous intéressons donc à cette problématique de la Qualité des Environnement Intérieurs. Dans le CHAPITRE I nous définissons la QEI en présentant quelques études de cas, nous présentons les critères pour l'évaluation de la QEI pour ensuite montrer la relation entre productivité et bien-être. Nous terminons ce chapitre par une introduction aux certifications environnementales (LEED, BREEAM et HQE). Ces démarches sont les seuls moyens de vérifier la bonne intégration des critères de QEI. Dans le CHAPITRE II, nous nous intéressons aux bâtiments performants et plus particulièrement à la Tour Elithis, premier bâtiment de bureaux en France à énergie positive. Nous présentons dans ce chapitre, le bâtiment et le suivi expérimental qui a été fait, en termes énergétiques, du confort ressenti et de la QAI. Dans le CHAPITRE III, nous présentons notre modèle numérique du bâtiment Tour Elithis ; bien que pendant la phase de conception une modélisation de ce bâtiment a été faite, pour notre travail de recherche ce modèle s'est avéré insuffisant. Pour cette raison, nous avons construit notre propre modèle. Dans la dernière partie, le CHAPITRE IV, nous présentons les indicateurs d'évaluation de la QEI et de la performance énergétique. Nous décrivons les différentes stratégies et le travail de modélisation qui a été fait autour d'elles, nous présentons les résultats obtenus avec les indicateurs de QEI et performance énergétique. Pour terminer, nous présentons nos conclusions et perspectives sur ce travail réalisé.

CHAPITRE II.

LA QUALITE DES ESPACES INTERIEURS (QEI)

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons à la définition de la Qualité des Environnement Intérieurs (QEI) et des critères pour leur évaluation. Dans une première partie, nous définissons la QEI et nous introduisons les critères de confort. Dans une deuxième partie, nous présentons quelques cas de bâtiments exemplaires qui ont intégré les critères de QEI. Pour terminer, nous présentons la relation entre productivité et la QEI et nous abordons les démarches environnementales LEED, BREEAM et HQE.

1. LA NOTION DE QUALITE DES ENVIRONNEMENTS INTÉRIEURS

Nous passons environ 30% de notre temps enfermés dans les bureaux, ces environnements peuvent influencer la santé mentale, les capacités et les performances des utilisateurs (Sundstrom, et al., 1994). Des facteurs tels que l'insatisfaction, l'encombrement des espaces et l'environnement physique de manière générale, jouent un rôle important dans la perte de la productivité des employés (Carnevale, 1992, Clements-Croome, 2000).

Dans la définition des espaces intérieurs nous avons 4 critères importants :

Le confort hygrothermique (Température et humidité)

Le confort visuel (éblouissement)

La qualité de l'air

Le confort acoustique (bruit)

La Qualité des Environnements Intérieurs peut être définie comme un ensemble de critères qui vont permettre d'évaluer l'ambiance dans laquelle nous sommes. D'une part, nous avons des critères de confort et d'autre part la consommation. L'aspect énergétique joue un rôle très important dans cette définition, puisque le confort ne peut pas être amélioré au détriment de la demande énergétique. La QEI est une combinaison des critères. Dans la figure 10, nous les présentons :

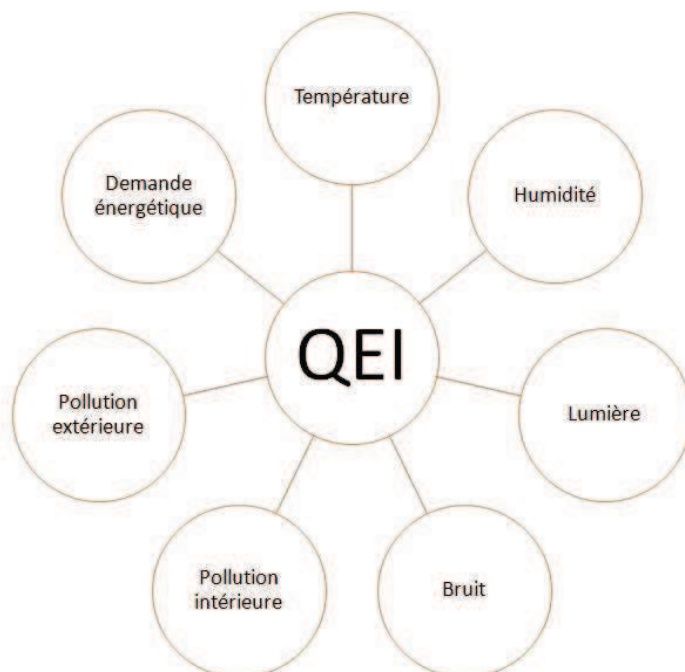


Figure 10. Critères de QEI

Le respect de l'ensemble de critères, évalués par des plages de valeurs, définit ce que nous appelons la Qualité des Environnements Intérieurs.

2. LES CRITERES DE CONFORT

Dans la norme NF 15251 nous retrouvons 4 catégories de bâtiments, ils sont présentés dans le tableau 1 :

Tableau 1. Catégories norme NF EN 15251

Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

En fonction de chaque catégorie, des valeurs pour les différents indicateurs de confort sont données. Pour notre cas, nous nous sommes positionnés dans la catégorie I, puisque les espaces doivent être conçus de manière optimale, le confort doit être assuré pour la plupart des occupants, peu importe les conditions climatiques. Pour le cas de bâtiments de bureaux, la productivité et le bien-être sont les critères les plus importants.

2.1 Le Confort hygrothermique

Le confort hygrothermique est défini comme une condition dans laquelle le corps humain est en équilibre thermique et hydrique avec l'ambiance dans laquelle il se situe. Le corps est un organisme homéotherme, c'est-à-dire, quelques soient les conditions extérieures, il va chercher à maintenir sa température intérieure. Pour cela, il possède plusieurs méthodes de régulation, le premier, la peau, et le deuxième l'hypothalamus, organe placé dans le cerveau qui agit quand la température du corps commence à monter.

En hiver, le sang s'épaissit et le flux vers la surface du corps ralentit (Ex : mains froides), par conséquent, la température de la peau diminue augmentant l'écart entre la température de la pièce et le corps, par conséquent les échanges convectifs et radiatifs avec l'environnement augmentent. Pendant la saison estivale, avec les températures plus élevées, le flux sanguin devient plus rapide qui occasionne une augmentation de la température de la peau, la conséquence est la transpiration. L'échange de chaleur entre le corps et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes : plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau). Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %). Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée (Fanger, 1973).

Pour l'analyse du confort thermique deux méthodes existent, la méthode développée par Fanger dans les années 1970 et la méthode adaptative proposée pour la première fois par De Dear en 1998 (De Dear 1998). Après avoir présenté rapidement ces deux approches, nous définirons la notion de température opérative qui permet de caractériser les ambiances de façon simple par rapport au confort perçu.

2.1.1 La méthode proposée par Fanger (Fanger, 1973)

Cette méthode considérée aujourd'hui comme référence et traduite sous forme de norme (EN 7730) est basée sur la définition de l'équilibre thermique du corps humain dans les bâtiments ventilés mécaniquement. C'est un modèle mathématique qui utilise des équations simples pour définir l'équilibre thermique du corps humain à partir des variables d'état (température d'air, humidité, températures des parois,...) qui caractérisent l'état thermique d'un local. Fanger a mené un certain nombre d'études dans des bâtiments occupés, qui lui ont permis de prédire une réponse en termes de confort ressenti en fonction de ces variables d'état. Cette notion, appelée « Predicted Mean Vote (PMV) » représente la réponse statistique en termes d'appréciation du confort thermique d'individus soumis à différentes conditions d'environnements intérieurs. A partir de cette appréciation statistique, un pourcentage d'insatisfaction appelé « Predicted Percentage of dissatisfied (PPD) » a été alors introduit pour qualifier l'ambiance intérieure. Cependant, la définition du PMV est valable seulement pour des personnes exposées de façon prolongée à des conditions constantes et avec un taux d'activité (métabolisme) constant.

Le principe de la conservation d'énergie pour le corps humain aboutit à l'équation de bilan thermique suivante :

Equation 1

$$H - Ed - E_{sw} - E_{re} - L = R + C$$

Avec:

H = métabolisme (M)

Ed = pertes de chaleur par diffusion de vapeur à travers la peau

E_{sw} = pertes de chaleur dues à la transpiration

E_{re} = pertes de chaleur latentes dues à la respiration

L = pertes de chaleur sèches dues à la respiration

R = pertes de chaleur par échange radiatif du corps habillé

C = pertes de chaleur par échange convectif du corps habillé

Chaque terme de l'équation peut être traduit par une équation issue de la physique de base. Outre les variables d'état qui définissent les transferts, ceux-ci sont également dépendants de paramètres locaux que sont :

- La turbulence de l'air
- La vitesse de l'air
- L'asymétrie de rayonnement
- Le Gradient vertical de température

Pour évaluer la perception de l'ambiance, le vote est ajusté sur une échelle à 7 niveaux:

- +3 très chaud
- +2 chaud
- +1 légèrement chaud
- ~0 neutre
- 1 légèrement froid
- 2 froid
- 3 très froid

Cette méthode a été transcrite dans la norme NF ISO 7730, toutes les équations ainsi que la méthodologie d'analyse y sont expliquées. Plus récemment, nous avons pu montrer que le comportement de l'occupant peut avoir un impact important au niveau de sa perception du confort. De plus, dans beaucoup de situations, les conditions à l'intérieur des bâtiments peuvent évoluer dans le temps. De ce fait, la méthode de Fanger peut trouver ses limites. Ainsi, en 1998, De Dear et Brager ont proposé une méthode appelée méthode adaptative qui permet de prendre en compte ses évolutions, notamment dans les bâtiments ventilés naturellement.

2.1.2 La méthode adaptative

Cette méthode est basée sur la relation qui existe entre la perception de l'ambiance intérieure et l'adaptation de l'individu en fonction d'une part des conditions intérieures, mais aussi du climat extérieur. En effet, nous avons pu montrer que dans une certaine mesure, le comportement des occupants peut s'adapter en fonction de conditions extérieures et intérieures variables tout au long de l'année. Cette méthode s'adapte plutôt dans les bâtiments ventilés naturellement, puisque les températures évoluent de manière plus importante, mais elle suppose aussi que les individus peuvent s'adapter et qu'ils ne sont pas contraints par exemple par des codes vestimentaires. .

Finalement, le résultat essentiel est que le confort ressenti évolue avec les conditions du climat extérieur traduit par une température moyenne glissante. La figure 11 montre cette évolution :

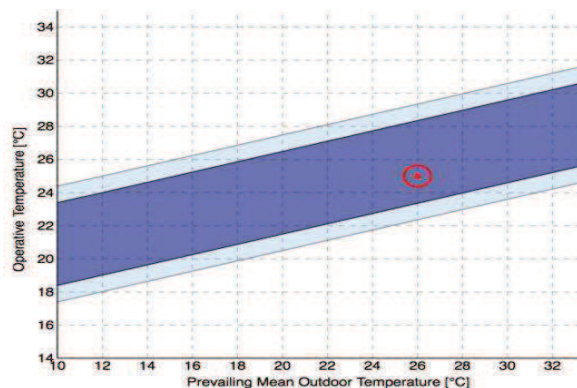


Figure 11. Températures opératives dans le confort adaptatif

Nous pouvons observer ici deux zones, une plus foncée qui définit le confort pour un taux de satisfaction de 90%, la plus claire est donnée pour 80% de satisfaction. A partir de cette figure nous pouvons déterminer la plage acceptable de températures en fonction de conditions extérieures connues. Pour caractériser la température de l'ambiance ressentie par l'occupant, nous utilisons ici la notion de température opérative.

2.1.3 Notion de température opérative

Cette température est définie comme la moyenne entre la température radiante moyenne (t_{rm}) et la température de l'air (t_a) pondérée par les coefficients A (EnergyPlus, 2013), elle est calculée de la manière suivante :

Équation 2. Température opérative

$$t_{op} = A t_a + (1-A)T_r$$

Les valeurs de A sont obtenues à partir du tableau 4, Les valeurs des coefficients d'échange convectif et radiatif sont à l'origine de ces valeurs :

Tableau 2. Valeurs du coefficient A

v_r	< 0.2 m/s (<40 fpm)	0.2 to 0.6 m/s (40 to 120 fpm)	0.6 to 1.0 m/s (120 to 200 m/s)
A	0.5	0.6	0.7

Dans des conditions normales, la vitesse de l'air dans la pièce est inférieure à 0.2 m/s, A, adopte une valeur de 0.5 dans la plupart de cas. La température radiante moyenne globalise les échanges thermiques par rayonnement dans l'ensemble de l'espace, l'équation 3 permet de calculer sa valeur :

Équation 3. Température radiative

$$T_r = T_{surf-1} F_{surf-1} + T_{surf-2} F_{surf-2} + + T_{surf-n} F_{surf-n}$$

Cette définition de la température opérative qui qualifie l'ambiance thermique perçue par un individu a l'avantage de la simplicité. Ainsi, elle peut être calculée aisément par la plupart des codes de simulation thermique dynamique (STD) des bâtiments.

2.1.4 Plage de valeurs du confort thermique

Cette définition de la température opérative a également permis de définir, en fonction de l'usage des locaux, des plages de variation acceptables en fonction de la qualité souhaitée. Ainsi la norme EN15251 définit-elle des plages de valeurs de température opérative associées à un niveau de confort souhaité et classé en 3 catégories (voir tableau 3) :

Le tableau 3 définit ces différentes plages de températures opératives.

Tableau 3. Plages de températures NF EN 15251

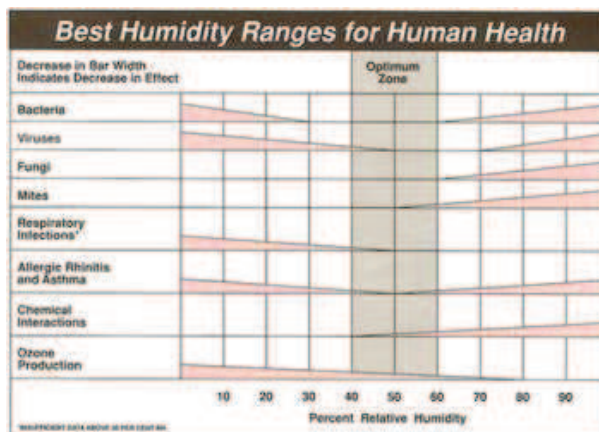
Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Plage de température pour le chauffage, °C Vêtue - 1,0 clo	Plage de température pour le rafraîchissement, °C Vêtue - 0,5 clo
Bâtiments d'habitation, pièces de séjour (chambres, séjours, etc.)	I	21,0 – 25,0	23,5 – 25,5
Activité sédentaire -1,2 met	II	20,0 – 25,0	23,0 – 26,0
	III	18,0 – 25,0	22,0 – 27,0
Bâtiments d'habitations, autres locaux (cuisines, rangements, etc.)	I	18,0 – 25,0	
Station debout, marche -1,5 met	II	16,0 – 25,0	
	III	14,0 – 25,0	
Bureaux et locaux à activité similaire (bureaux individuels ou paysagés, salles de réunion, auditoriums, cafétérias, restaurants, salles de classe)	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	20,0 – 24,0	23,0 – 26,0
Activité sédentaire -1,2 met	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0
Ecoles maternelles	I	19,0 – 21,0	22,5 – 24,5
Station debout, marche -1,4 met	II	17,5 – 22,5	21,5 – 25,5
	III	16,5 – 23,5	21,0 – 26,0
Grands magasins	I	17,5 – 20,5	22,0 – 24,0
Station debout, marche -1,6 met	II	16,0 – 22,0	21,0 – 25,0
	III	15,0 – 23,0	20,0 – 26,0

Dans notre cas, pour des bureaux, dans la catégorie I qui correspond au cas le plus performant, les valeurs pour le mode hiver se situent entre 21 et 23°C de température opérative, et pour le mode été entre 23,5 et 25,5°C.

2.2 Le confort et l'humidité relative

Dans le tableau 4, nous présentons les valeurs optimales pour le confort quant à l'humidité définies par l'ASHRAE. La zone de confort se situe entre 40 et 60 % d'humidité relative. En plus du confort ressenti, des valeurs trop faibles d'humidité relative peuvent augmenter le risque de prolifération de bactéries, virus et le risque d'infections pulmonaires augmente, de la même manière des valeurs trop élevées augmentent le risque de prolifération de champignons et moisissures, qui peuvent affecter la santé de l'occupant et même le bâtiment. En France, les conditions climatiques ne demandent pas, en général, un traitement particulier de l'air vis-à-vis de son humidité relative.

Tableau 4. Valeurs d'humidité relative préconisées à l'intérieur des bâtiments (ASHRAE)



Dans l'analyse de l'impact de l'humidité nous distinguons deux critères, le premier pendant la période d'occupation (12h) et le deuxième sur toute la durée (24h). Pendant la période d'occupation, les valeurs d'humidité peuvent jouer sur le confort et sur la santé des occupants, (Shaman & Kohn, 2009). Cependant, l'humidité est aussi un paramètre important pour le bâtiment puisque des valeurs trop importantes peuvent développer des moisissures et endommager la structure du bâtiment, c'est la raison pour laquelle on doit aussi la surveiller même en période d'inoccupation du bâtiment. La température et l'humidité sont des facteurs qui peuvent influencer le confort. La figure 12 présente la relation qui existe entre taux d'insatisfaction vis-à-vis de la QAI, la température et l'humidité (Fang, et al., 1998) :

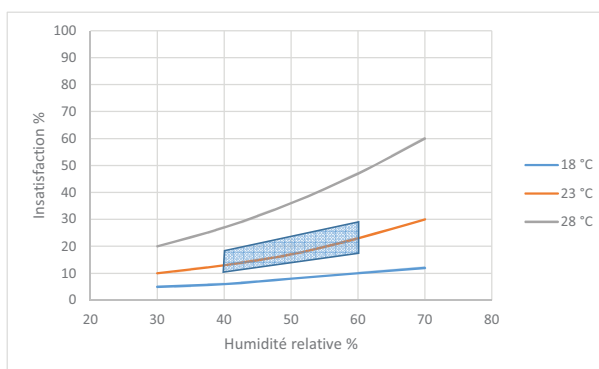


Figure 12. Relation entre température, humidité et perception de la QAI

Les températures élevées améliorent considérablement la perception de l'ambiance. Le taux d'insatisfaction augmente rapidement avec la température mais aussi avec l'humidité. En prenant les plages de valeurs pour l'analyse du confort thermique et l'humidité, voir tableaux 3 et 4, une zone de confort se dessine autour d'un taux d'insatisfaction de 20%.

2.3 Le confort visuel

En ce qui concerne le confort visuel, nous avons deux paramètres principaux, le niveau d'éclairage et le risque d'éblouissement dans le champ visuel.

2.3.1 Les niveaux d'éclairage

Dans le tableau 5, nous présentons les valeurs recommandées pour l'éclairage dans les immeubles de bureaux...

Tableau 5. Plages de valeurs d'éclairage

Type de bâtiment	Espace	Éclairage maintenu, \bar{E}_m , dans les zones de travail, lx	UGR	Ra	Remarques
Immeubles de bureaux	Bureaux fermés	500	19	80	à 0,8 m
	Bureaux paysagés	500	19	80	à 0,8 m
	Salles de réunion	500	19	80	à 0,8 m

2.3.2 Le risque d'éblouissement

Le risque d'éblouissement est dû à l'hétérogénéité des luminances dans le champ visuel. Par exemple, quand une personne est placée tournant le dos au vitrage, il est plus difficile de voir son visage, puisque la luminance de la vitre qui entoure son visage est très importante par rapport à celle du visage. En cas d'exposition répétée à de telles configurations, la fatigue visuelle apparaît. Pour le déterminer, l'indice DGI ou Daylight Glare Index est fréquemment utilisé. Il est calculé de la manière suivante :

Équation 4

$$DGI = 10 \log 0.478 \sum_{i=1}^n \frac{L_i^{1.5} \Omega^{0.8}}{L_b + 0.07 \omega^{0.5} L_i}$$

Ls = luminance (cd/m²)

Lb = Luminance moyenne du fond (cd/m²)

ω = Taille angulaire de la source vu par l'œil (Stéradians)

Ω = Angle solide sous-tendu par la source définie par la position de l'œil (Stéradians)

Le DGI permet de déterminer l'inconfort visuel par rapport à lumière extérieure, les valeurs limites acceptables (tableau 6) dépendent de l'activité du sujet. :

Tableau 6. Valeurs du DGI

Recommended Values of Maximum Allowable Discomfort Glare Index	
Activity or zone type	Maximum Allowable Discomfort Glare Index
Art Galleries	16
Factories	
Rough work	28
Engine assembly	26
Fine assembly	24
Instrument assembly	22
Hospital wards	18
Laboratories	22
Museums	20
Offices	22
School classrooms	20

2.4 Le confort acoustique

Ce critère n'est pas traité dans notre analyse puisque les moteurs de calcul actuels ne sont pas capables pour l'instant de fournir une valeur simple et précise.

2.5 Qualité de l'air

La ventilation est le moyen le plus utilisé pour traiter la qualité de l'air dans un bâtiment. Dans l'analyse de l'efficacité de la ventilation, nous retrouvons deux critères, à savoir, l'efficacité du renouvellement d'air et l'efficacité d'élimination des polluants (Koffi, 2009). Le premier, l'efficacité du renouvellement de l'air, c'est un critère indépendant à l'émission des matériaux, il permet de déterminer la capacité d'un système de ventilation, d'apporter de l'air neuf et propre dans un volume. Il peut être défini par trois principes (figure 13), le temps caractéristique de l'air, l'efficacité du renouvellement de l'air et l'indice local du renouvellement de l'air.

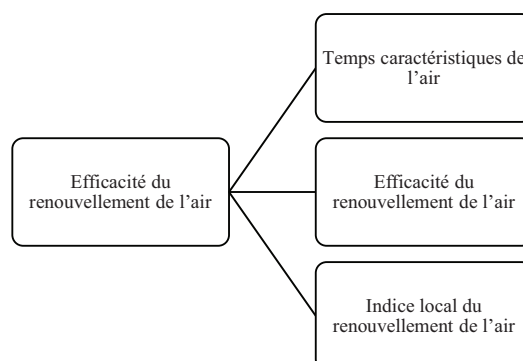


Figure 13. Indice d'efficacité du renouvellement de l'air

Le deuxième est l'efficacité d'élimination des polluants, qui concerne la distribution et dilution des polluants dans un volume. Il est défini par quatre critères exposés dans la figure 14 :

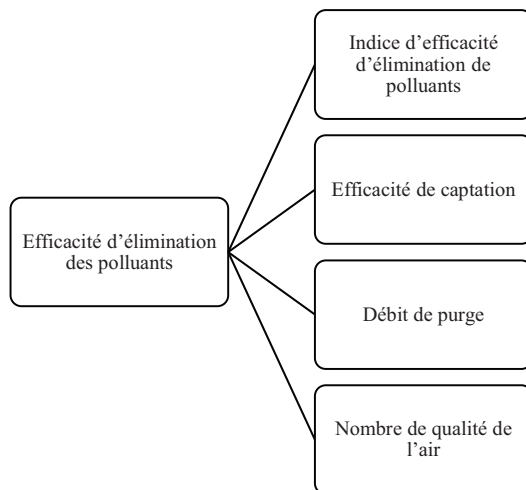


Figure 14. Indice d'efficacité d'élimination des polluants

La qualité de l'air peut être mesurée par deux approches, l'approche du renouvellement d'air et l'approche de l'élimination des polluants. L'évaluation de la QAI proposé par ces approches, définit un certain nombre d'indices, pour notre cas, nous considérons que leur utilisation est difficile à mettre en place. Nous définissons donc, des valeurs limites à atteindre.

2.5.1 Approche du renouvellement d'air

Le dioxyde de carbone est émis principalement par la respiration, environ 18 l/h (0,018 m³/h). L'autre source provient de l'air extérieur (combustion des machines, industrie), la concentration moyenne est de 400 ppm en moyenne (Observatory, 2013). Le CO₂ ce n'est pas un polluant pour l'homme de manière générale, puisque la concentration maximale que peut supporter l'homme doit être supérieure à 5000 ppm. Néanmoins, des valeurs supérieures à 1500 ppm peuvent être l'indicateur d'un mauvais renouvellement de l'air. Il n'existe pas de relation entre le CO₂ et d'autres polluants mais une augmentation de la concentration de CO₂ peut traduire également une augmentation de la concentration d'autres polluants. La figure 15, présente la relation entre la concentration de CO₂ et le taux d'insatisfaction.

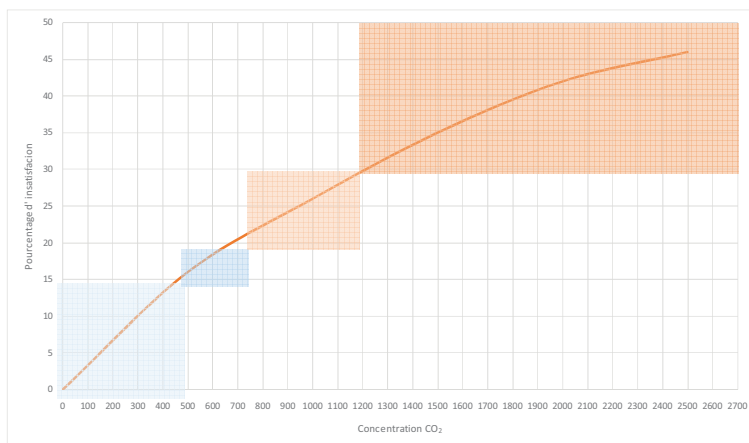


Figure 15. Perception de la QAI avec la concentration de CO₂

Des concentrations supérieures à 1000 ppm vont augmenter l'insatisfaction vis-à-vis de la QAI perçue et par conséquent la productivité peut diminuer. Dans la figure 16, nous pouvons observer la relation qui existe entre la perception de la qualité de l'air et la performance (Wargocki, et al., 2000).

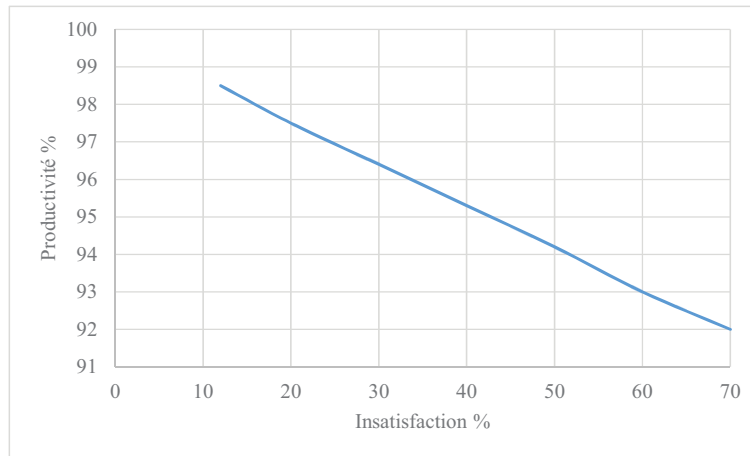


Figure 16. Relation entre productivité et Taux d'insatisfaction

De manière générale, pour avoir une concentration de CO₂ de 1000 ppm, un débit de 18 m³/h (Roulet, 2004) est suffisant. Dans le tableau 7, nous présentons les valeurs préconisées en fonction de la catégorie de qualité souhaitée :

Tableau 7. Plages de valeurs de la concentration de CO₂

Catégorie	Concentration maximale en CO ₂ au-dessus de celle à l'extérieur, ppm, pour les calculs énergétiques
I	350
II	500
III	800
IV	< 800

Pour notre cas, nous prenons comme référence une concentration de 350 ppm au-dessus de la valeur extérieure.

2.5.2 Approche sanitaire de la QAI – Élimination des polluants

2.5.2.1 Pollution intérieure

Dans l'air intérieur nous retrouvons un certain nombre de polluants qui peuvent être classés en fonction de leur dangerosité. Les polluants rencontrés à l'intérieur des bâtiments peuvent provenir de sources intérieures : ils sont émis par les matériaux de construction, par les occupants, par les activités réalisées, ou bien ils ont été transférés à l'intérieur du bâtiment à partir de sources extérieures (radon, polluants atmosphériques, particules). Ils peuvent être classés en plusieurs familles, gazeux ou particulaires, inertes ou biologiques.

Pour les polluants gazeux, ils peuvent être inorganiques ou organiques en fonction de leur composés. Pour les polluants organiques, leur température d'ébullition à pression atmosphérique permet de les classer en composés organiques volatils (COV) quand celle-ci est faible, puis en composé organique semi volatils quand celle-ci devient plus élevée. Les Composés Organiques Volatiles (COV) constituent ainsi une part importante des polluants rencontrés en phase gazeuse dans tous les environnements intérieurs.

Dans la littérature, peu de données détaillées existent vis-à-vis des valeurs de concentration des COV dans l'air intérieur de bureaux. Seulement quelques campagnes de mesure de la qualité de l'air intérieur réalisées par le réseau de surveillance de la qualité de l'air (ATMO) existent.

Parmi les polluants ciblés par ces études, le formaldéhyde est un des polluants le plus présent car d'une part il est systématiquement retrouvé dans les environnements intérieurs, et d'autre part sa dangerosité fait qu'il est surveillé de près. En effet, il a été classé comme cancérigène par le Centre international de recherche sur le cancer CIRC, en 2004. Avec la figure 17 nous présentons les résultats de campagnes de mesures de la QAI dans des bâtiments tertiaires réalisées par les réseaux Atmo :

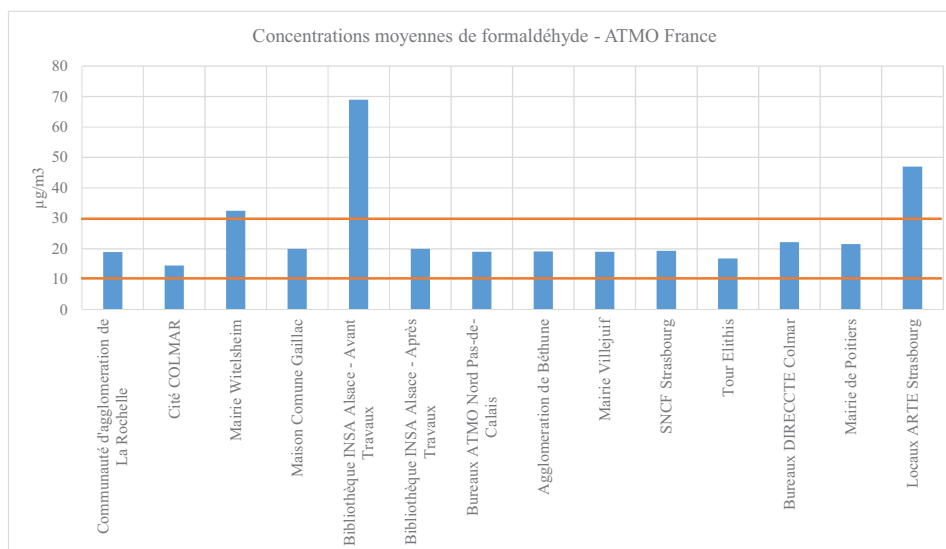


Figure 17. Résultats campagnes de mesures réalisées par ATMO dans les bureaux

Les valeurs de la concentration de formaldéhyde se situent entre 10 et 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec quelques disparités observées. La qualité de l'air dans les bâtiments étudiés peut être considérée comme acceptable par rapport aux valeurs préconisées par le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP, 2009). En effet, les valeurs recommandées sont les suivantes :

$\leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur cible sanitaire à atteindre en 10 ans. Une concentration inférieure permet de classer la qualité de l'air du bâtiment comme très bonne. C'est un objectif mais qui doit commencer à être appliqué dès maintenant notamment pour les bâtiments neufs et récemment renouvés.

$\leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur de référence aujourd'hui en dessous de laquelle aucune action corrective n'est nécessaire.

$\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur maximale admissible, les sources doivent être identifiées et des mesures correctives mises en œuvre.

Pour notre analyse nous prendrons le formaldéhyde comme « représentant » des polluants intérieurs et nous retiendrons les deux premières valeurs comme indicateurs. L'objectif est une concentration inférieure à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mais si la valeur se situe en dessous de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nous pouvons considérer la qualité de l'air comme bonne.

2.2.5.2 Pollution extérieure sur la QAI.

Une source importante de polluants est la pollution extérieure. Les polluants atmosphériques principaux sont :

- Le dioxyde de carbone
- L'Ozone
- Le dioxyde de soufre
- Les oxydes d'azote
- Les particules fines
- COV
- Hydrocarbures légers (benzène)

Ces polluants sont transférés dans l'air intérieur, par les systèmes de ventilation, les infiltrations propres aux bâtiments et les différentes ouvertures, cette pollution extérieure présente un risque considérable pour la santé.

Une étude publiée en Avril 2014, par l'ANSES, le CSTB et l'OQAI (ANSES, et al., 2014) sur l'impact sanitaire de la qualité de l'air intérieur a montré l'importance des particules fines. La figure 18 montre l'impact sanitaire par type de polluant (ANSES, 2014) :

		Âge au décès	Espérance de survie	Nombre d'années de vie perdue	Années de pension perdus	Incidence morbidité	Nombre de décès
Benzène	leucémie	65	15	15	15	385	342
Trichloréthylène	cancer du rein	65	1.5	15	15	54	20
Radon	cancer du poumon	69	1.5	11	11	2 388	2 074
CO	asphyxie	33	0	47	20	-	98
Particules	cancer du poumon	69	1.5	11	11	2 388	2 074
	cardio-vasculaire	77	13	3	3	10 006	10 006
	BPCO	79	12	1	1	10 390	4 156
Fumée de tabac	cancer poumon	69	1.5	11	11	175	152
environnementale	infarctus	77	13	3	3	1331	510
	AVC	80	11	0	0	1 180	392
	BPCO	79	12	1	1	150	60

Figure 18. Impact sanitaire de la pollution intérieure (ANSES)

Le nombre de décès liés aux particules fines est très important, il représente plus de 16.000 décès par an. De ce fait, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé les particules fines dans le groupe I, c'est-à-dire cancérogènes pour l'homme. En France, une valeur guide a été proposée par l'Observatoire de la Qualité de l'air intérieur de $\leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour une exposition à court terme (24h) avec un objectif pour 2025 de $\leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le terme particule concerne des aérosols liquides ou solides atomisés, les poussières, fumées, suies, brumes, brouillards, smog font partie de cette définition. Vis-à-vis de la qualité de l'air, les particules se divisent en fonction de leur taille, $\leq 10\mu\text{m}$ (PM 10) et $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM 2,5), ces dernières sont les plus préoccupantes :

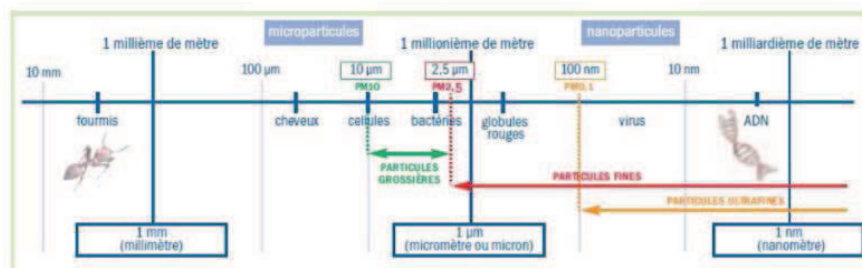


Figure 19. Taille de particules

Dans la figure 19, nous pouvons observer la classification des particules par rapport à leur taille, les particules inférieures à $2,5 \mu\text{m}$ présentent un risque important, leur taille est comparée à celle de globules rouges et virus, les conséquences au niveau de la santé peuvent être considérables. Les particules dont le diamètre est supérieur à $10 \mu\text{m}$ se déposent surtout par impaction dans la zone rhino-pharyngienne (voies aériennes supérieures – nez, cavité nasale et gorge). Ce mécanisme prend le pas sur les autres à cause de la grande vitesse de l'air et du grand nombre de virages dans les voies aériennes rhino-pharyngiennes. À cause des nombreux changements de direction de l'écoulement d'air, de nombreuses particules touchent les parois du passage d'air et s'y déposent. Les petites particules d'un diamètre aérodynamique d'environ $0,003 \mu\text{m}$ à $5 \mu\text{m}$ (CCHST, 2012) se déposent dans les régions trachée-bronchiques et alvéolaires. La sédimentation est le mode de dépôt le plus commun parce qu'à ce point, la vitesse de l'air a diminué suffisamment pour que les particules puissent se déposer.

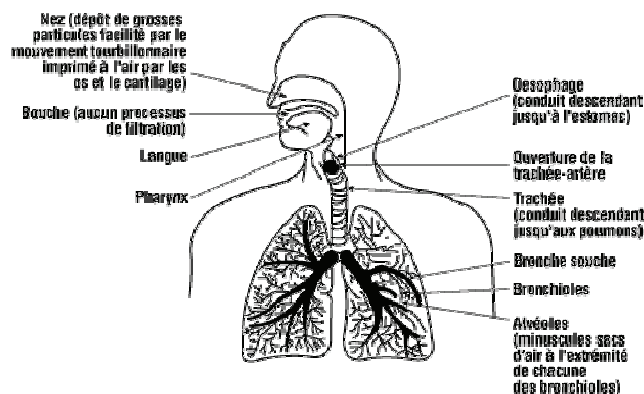


Figure 20. Dépôt de PM dans le système respiratoire humain (CCHST)

Lorsque l'air atteint la zone alvéolaire (partie inférieure des poumons), sa vitesse est encore plus faible et, à toutes fins utiles, il est stagnant. Habituellement, seules les matières particulaires de $0,5 \mu\text{m}$ ou moins peuvent atteindre

cette zone terminale des poumons. La plupart d'entre elles pénètrent dans les poumons en se posant au hasard sur la membrane ou dans d'autres parties des poumons (CCHST, 2012).

De manière générale, 80% des particules retrouvées dans l'air intérieur proviennent essentiellement de l'air extérieur (CSTB, 2001), mais tout est fonction du système de ventilation et du lieu, centre ville, périphérie. Dans une étude récente, le pourcentage de particules fines PM_{2.5} provenant de l'air extérieur et retrouvées dans l'air intérieur varie de 40 à 70% (Hanninen, 2012) avec une concentration moyenne observée de 34,5 µg/m³ (Mosqueron, 2001).

La principale source de particules à l'intérieur des bâtiments est ainsi l'air extérieur, la contribution en fonction des secteurs d'activité. Nous la présentons dans la figure 21 :

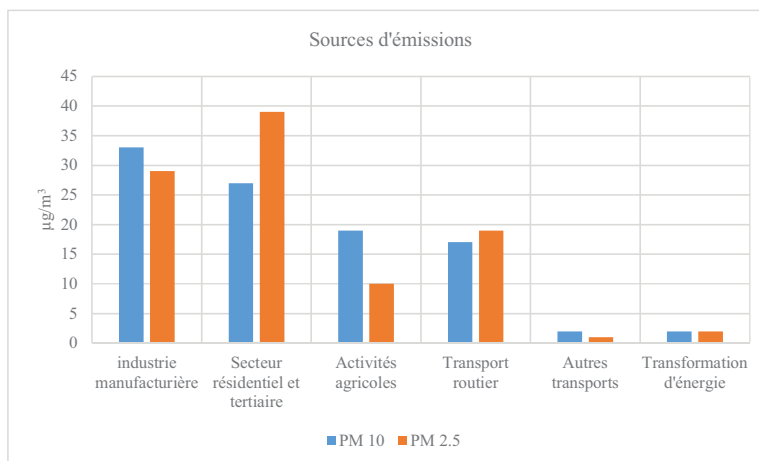


Figure 21. Contribution à la pollution par les particules fines par secteur d'activité (ADEME)

En France quatre secteurs se partagent les émissions des particules fines principalement, en ce qui concerne les PM₁₀ l'industrie manufacturière est la source d'émission la plus importante et en ce qui concerne les PM_{2.5} c'est le secteur résidentiel et tertiaire.

La Qualité de l'Air Intérieur est impactée par deux facteurs, les polluants intérieurs et les polluants extérieurs. Pour notre analyse, nous prendrons le formaldéhyde comme traceur de la pollution intérieure et les particules fines PM 2.5 comme traceur de la pollution extérieure. Nous utiliserons les valeurs guides proposés par le HCSP, <10 µg/m³ pour le formaldéhyde et inférieur à 25 µg/m³ pour le cas des particules fines. Pour ce dernier, nous évaluerons sur une durée d'exposition plus courte, 12h au lieu de 24h, puisque c'est la période d'occupation d'un bâtiment de bureaux (7h à 19h).

Tableau 8. Valeurs pour l'analyse de la QAI

Formaldéhyde	< 10 µg/m ³	Durée d'exposition (12h)
Particules Fines PM 2.5	< 25 µg/m ³	Durée d'exposition (12h)

3. RELATION ENTRE PRODUCTIVITÉ ET BIEN-ÊTRE

Tout d'abord nous allons parler de bien-être et de sa relation avec la productivité ; ce critère peut représenter un bénéfice économique pour une entreprise, s'il est considéré dès la phase de conception.

3.1 Température et productivité

La température d'une pièce, dans notre cas le bureau, peut affecter considérablement la performance de l'occupant. Une mauvaise gestion de la température peut contribuer au développement du SBM, puisque des phénomènes, comme ceux-ci cités à continuation, apparaissent et vont impacter la performance de l'employé :

Mains et/ou pieds froids

Dos froid

Sensation de chaleur du au soleil (rayonnement)

Étouffement

La diminution du rendement peut varier de 5% à 15% (Wargocki, et al., 2006) en fonction du lieu et type d'activité. La figure 22 présente la relation entre température et performance (Sepänen, et al., 2006) :

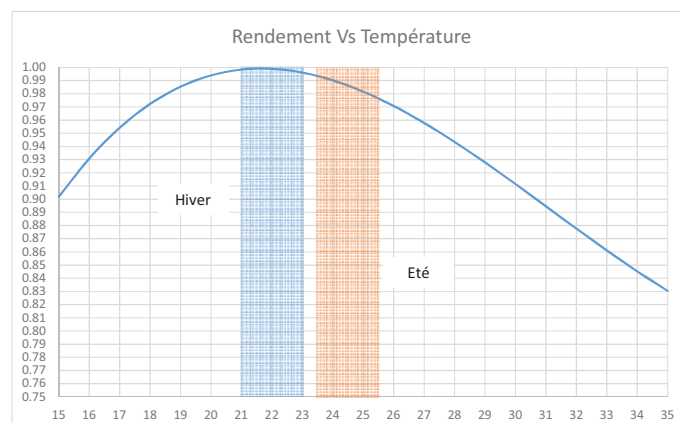


Figure 22. Productivité Vs Température

La courbe montre la diminution de la performance en fonction de la température. Un point d'équilibre est observé 21,75°C où la productivité serait maximale ou peu influencée par la température. La norme NF 15251 pour la catégorie I définit une zone idéale entre 21 et 23°C pour le cas hiver et 23,5°C et 25,5°C pour le cas été ; avec ces valeurs nous obtenons une perte d'environ 0,5% pour le cas hiver et de 1,5% pour le cas été, qui est moins intéressante. La perte de productivité s'accroît avec les températures plus élevées, la bonne maîtrise de températures est un facteur important.

Dans une étude menée dans un bâtiment de bureaux à Helsinki (Wargocki, et al., 2006), il a été observé le gain en productivité avec la mise en place de différentes solutions pour la gestion de températures pendant la saison d'été. Le coût nécessaire pour améliorer la productivité (Investissement + opération) peut être compensé par le bénéfice généré par une meilleure productivité.

Le tableau 9 présente les solutions proposées ainsi que le cas de base :

Tableau 9. Variantes Bâtiment Bureaux à Helsinki

Cas de base	Protections solaires : Store vénitiens Débit de ventilation : 70 m ³ /h personne -10h par jour
Solution 1	La capacité frigorifique a été augmentée à 20 W/m ²
Solution 2	Le scénario de fonctionnement de la ventilation passe de 10h à 24h (été)
Solution 3	Le débit passe de 70 m ³ /h à 140 m ³ /h personne et un scénario de fonctionnement de 24h
Solution 4	1 + 2 +3

Les résultats ont été les suivants :

Tableau 10. Résultats en termes de productivité

Description	Cas de base	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Consommation totale (€/an personne)	47,8	49,4	54,1	87,8	87,7
Perte productivité (€/an personne)	686	501	408	211	141
Bénéfice (€/an personne)	0	184	278	475	545

Le coût lié à la mise en place de solution est importante, tenant compte que la consommation énergétique augmente. L'analyse a été faite en fonction du prix par employé, avec la solution 4, ce prix se duplique. La perte de productivité associée à une mauvaise gestion de températures, est estimée à 686 €/an personne, ce qui peut paraître faible. La perte de productivité entre le cas de base et la solution 4 a été réduite d'environ 6 fois. Au final, le bénéfice créé par une bonne gestion des températures ou plutôt une amélioration du confort peut être largement amorti. En revanche, l'impact environnemental d'une telle stratégie est très important, la consommation du bâtiment augmente considérablement. La productivité a été améliorée ce qui se traduit par un bénéfice pour l'entreprise et du bien-être de l'employé en revanche l'impact énergétique reste un inconvénient.

3.2 Ventilation et performance

Une des méthodes les plus efficaces pour réduire la concentration des polluants c'est la ventilation. Des études ont été menées dans des centres d'appels qui ont permis d'observer cette relation (Wyon & Wargocki, Indoor air quality effects on office work, 2006). Il a été observé qu'en augmentant le débit de ventilation par personne de 10 m³/h à 80

m³/h la performance des opérateurs de call centers avait augmenté de 9% et l'absentéisme avait aussi été de réduit de 35%. Dans la cas précédent, nous avons aussi observé ce même analyse. La figure 23, présente la relation établie entre débit de ventilation et productivité.

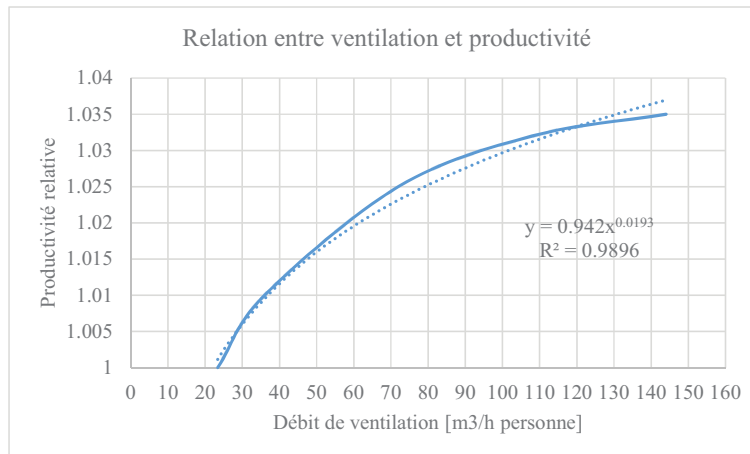


Figure 23. Relation entre ventilation et productivité

Augmenter le débit de ventilation peut permettre d'améliorer la productivité d'environ 1,5%. L'impact économique en termes de consommation est présenté dans la figure 24 (Wargocki, et al., 2006) :

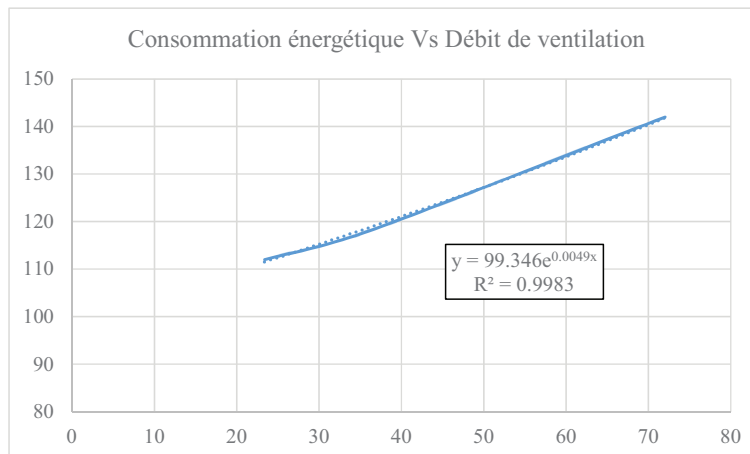


Figure 24. Relation entre consommation et débit de ventilation

Le fait de passer d'un débit de 25 à 36 m³/h peut représenter une augmentation de 5% de la demande (chauffage + ventilation), une augmentation de 36 à 72 m³/h personne peut représenter jusqu'à 20%. L'impact énergétique d'une telle stratégie a un impact important qui augmente exponentiellement avec le débit. Une modification de débits de ventilation peut avoir un impact important sur l'environnement, il est important donc, de trouver d'autres stratégies qui vont permettre de diminuer cette demande énergétique tout en optimisant le confort des occupants.

La relation qui existe entre productivité et débit de ventilation est évidente, un apport en air frais et propre plus important peut l'expliquer mais aussi le fait que les concentrations des polluants présents dans l'air diminuent, le renouvellement d'air permet de mieux évacuer la pollution intérieure (approche du renouvellement). Il est cependant probable que la productivité soit liée à la concentration de polluants dans l'air et non pas au taux de renouvellement d'air (approche de l'élimination des polluants).

Nous avons présenté les critères de confort ainsi que la relation qui peut exister entre productivité et confort. Maintenant, nous allons présenter quelques études de cas de bâtiments de bureaux exemplaires. Ils présentent partiellement les critères de QEI. Nous allons voir que l'efficacité énergétique peut être atteinte tout en optimisant le confort .

4. ETUDE DE CAS – QUELQUES EXEMPLES DE BÂTIMENTS DE BUREAUX

Nous présentons quelques exemples de bâtiments de bureaux à faible demande énergétique qui intègrent quelques évaluations de la QEI.

4.1 The Basler Versicherung Building – Suisse



Figure 25. Le Basler Versicherung Building - Suisse

4.2.1 Description

Le Basler Versicherung Building présenté sur la Figure 25. Le Basler Versicherung Building - SuisseFigure 25 est un bâtiment de bureaux d'une compagnie d'assurances. Il a été construit en 1994 et situé à Bâle en Suisse. Il est composé de 8 niveaux de 660m² chacun, 220 personnes y travaillent. Le suivi de ce bâtiment a été réalisé dans le cadre du projet NatVent¹. Les bureaux qui ont été instrumentés se situaient au 6^{ème} étage (Figure 26), deux dans l'aile Sud-ouest et un dans l'aile Nord-est. Les performances de ce bâtiment se démarquent car il a été construit dans une zone urbaine et malgré cela il est ventilé de façon naturelle. Il a atteint des niveaux de confort thermique et énergétiques intéressants.

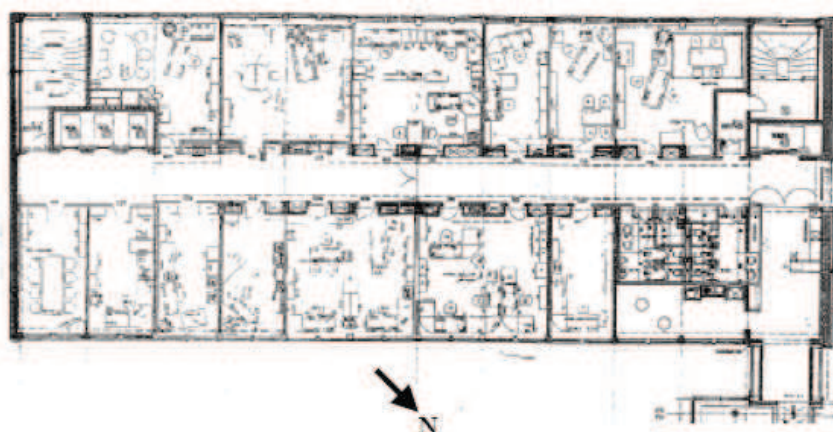


Figure 26. Plan du 6^{ème} Niveau

4.2.2 Principe de ventilation

Ce bâtiment a été conçu sans aucun système de ventilation mécanique. Le principe de ventilation est naturel avec des fenêtres en façade. Deux positions d'ouverture des fenêtres sont considérées, une position pour le mode hiver

¹ NatVent. Projet Européen qui avait comme objectif de démontrer la faisabilité de la ventilation naturelle dans les espaces urbains. <http://projects.bre.co.uk/natvent/>

ou débits réduits (Figure 27 à gauche) et une autre pour le mode été ou pour des débits plus importants (Figure 27 à droite). Aucun système de climatisation n'est présent dans le bâtiment. La nuit, aucun système de ventilation nocturne n'a été prévu à cause de la sécurité (périmètre urbain).



Figure 27. Ouverture des fenêtres - mode hiver - mode été

4.2.3 Stratégie de régulation

Les fenêtres sont pilotées manuellement, idem pour le système de chauffage. La stratégie de rafraîchissement consiste à ouvrir les fenêtres du côté Sud-Ouest les matins car cette façade est protégée du soleil à ce moment. L'après-midi, les portes des couloirs restent ouvertes. De l'autre côté du bâtiment, façade Nord-est, le choix de la stratégie de fonctionnement est laissé à l'utilisateur, c'est lui-même en fonction de son ressenti, qui conseille la meilleure manière de manipuler les fenêtres. Pour le mode d'hiver, un système de chauffage, placé en-dessous des fenêtres, permet d'assurer le confort de l'occupant. L'ouverture ou la fermeture des fenêtres est laissée au choix de la personne.

4.2.4 Suivi du bâtiment

Pendant une semaine d'été et une semaine d'hiver de l'année 1997 trois bureaux ont été suivis au sixième étage. La température, la vitesse d'air intérieur, la concentration de CO₂, le débit de ventilation et l'humidité ont été suivis de façon continue. La surface moyenne de chaque bureau est de 30 m². Chaque bureau était occupé par 4 à 6 personnes la plupart du temps. L'activité était plutôt sédentaire au repos, l'apport interne maximal enregistré en hiver et en été a été de 45 W/m².

4.2.5 Résultats et conclusions

Pour le mode estival, la température intérieure s'est maintenue autour de 27°C ce qui peut paraître un peu élevée pour des conditions optimales de travail. Les concentrations de CO₂ mesurées ne dépassent pas 600 ppm, valeurs qui sont faibles et qui s'expliquent par des taux de renouvellement importants. Les résultats du suivi de la semaine d'été sont montrés sur la Figure 28.

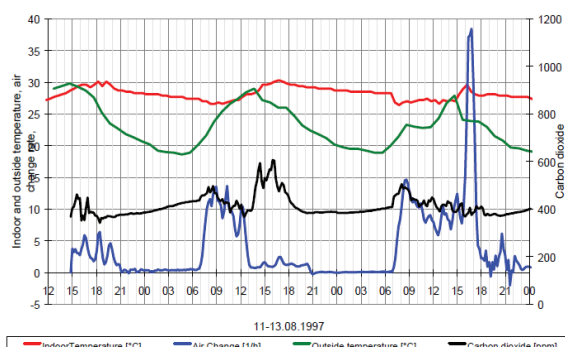


Figure 28. Résultats et conclusions expérimentaux journée type été.

La Figure 29 présente les résultats obtenus pour le mode hiver. Le taux de renouvellement d'air est inférieur à 1 vol/h, par conséquent les concentrations de CO₂ sont plus importantes mais restent inférieures à 900 ppm. Les températures enregistrées ont été assez constantes, autour de 23°C.

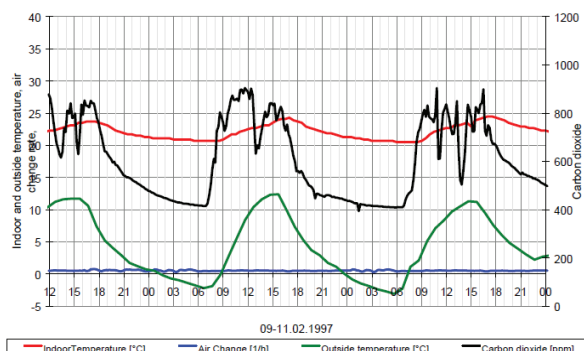


Figure 29. Résultats et conclusions expérimentaux journée type hiver.

Pendant l'été 1997, les températures enregistrées ont été assez élevées, entre 27 à 30°C, le niveau de confort thermique d'après la NF EN 15251 n'est pas satisfaisant (max 25,5°C Cat I). En termes de CO₂, les valeurs enregistrées n'ont jamais dépassées les 600 ppm, nous constatons un bon renouvellement d'air, malgré la forte densité dans les bureaux. En même temps la vitesse d'air intérieur a été très élevée autour de 0,7 cm/s, ce qui a conduit à des problèmes d'inconfort. Les températures pendant la période hivernale ont été voisines de 21 à 24 °C, aucun problème d'inconfort n'a été constaté. Nous avons observé dans ce bâtiment plusieurs choses, au niveau du confort thermique, malgré les températures assez élevées pendant l'été, peu de plaintes ont été signalées, aucun moyen de climatisation n'est utilisé et les fenêtres peuvent être manipulées librement. De la même manière, il bénéficie d'une exposition traversante ce qui favorise le balayage de l'air. Il n'existe pas d'information au niveau de la consommation, il est probable que la partie la plus importante est due au chauffage. Au niveau de la ventilation, la consommation doit être nulle ce qui pourrait permettre de compenser le chauffage. Le niveau de confort et les concentrations de CO₂ sont intéressantes et cela malgré une ventilation naturelle.

4.2 IVEG. Intercommunale de distribution d'électricité et de gaz.



Figure 30. Bâtiment IVEG

4.2.1 Description

Le bâtiment présenté Figure 30, se démarque par ses performances énergétiques. Il a été construit en 1999, il est situé en Belgique dans la ville de Hoboken, un quartier suburbain d'Anvers. La surface totale est de 1800 m², développée sur 4 niveaux. Il est situé le long d'une rue dont la circulation est relativement importante. Sa forme est rectangulaire et il a deux façades, l'une exposée NNO et l'autre SSE. 70 personnes travaillent dans ce bâtiment. Sa conception a permis d'atteindre d'excellents niveaux de performance. C'est un exemple qui permet de dire que la combinaison performance énergétique, confort thermique et olfactif est une cible réaliste.

4.2.2 Principe de ventilation

Le système de ventilation est assuré par une centrale classique de traitement d'air double flux avec récupération de chaleur. Par contre le débit par occupant est de 40 m³/h dans les bureaux individuels et de 30 m³/h par personne dans les espaces ouverts. Ces valeurs sont bien supérieures à celles recommandées en France (25 m³/h par personne). La nuit, si nécessaire, le bâtiment est sur ventilé afin de le rafraichir, permettant ainsi de balayer environ 6 vol/h. Des ouvertures en façade et des cheminées en toiture ont été conçues, spécifiquement, pour cela, Figure 31.



Figure 31. Système d'extraction - Ventilation Naturelle

4.2.3 Stratégie de régulation

La ventilation en journée est contrôlée par des détecteurs de présence. Le soufflage est fait dans les bureaux et l'extraction dans les toilettes. L'éclairage est contrôlé également par les détecteurs de présence, des stores extérieurs automatisés permettent de gérer les apports solaires. La nuit la Gestion Technique Centrale (GTC) gère l'ouverture et la fermeture des cheminées en toiture. Pour réduire les consommations liées au rafraîchissement, l'inertie du bâtiment a été particulièrement étudiée. Tous les faux plafonds sont perforés, permettant ainsi une bonne circulation d'air afin d'améliorer l'efficacité de la sur ventilation.

4.2.4 Suivi du bâtiment

Le suivi de ce bâtiment a été réalisé dans le cadre du projet HYBVENT² de l'AIE³ et du projet Kantoor 2000 du gouvernement Flamand. Il a commencé en août 2000 et il s'est terminé en Juin 2002. Les résultats du suivi que nous présentons se focalisent sur l'année 2001.

4.2.5 Résultats et conclusions

La consommation totale enregistrée a été de 100 kWhEP/m² an. Aucune consommation de climatisation n'a été enregistrée pendant la période de mesure. Cela a été atteint grâce à la forte inertie thermique des planchers, béton, directement mise en jeu par l'absence de faux plafond. La répartition de la consommation est représentée dans la Figure 32 :

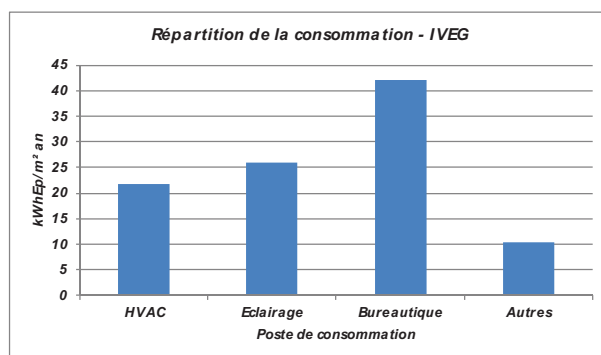


Figure 32. Consommation Totale bâtiment IVEG

Au niveau de la température, le suivi du bâtiment a permis d'identifier le nombre d'heures de dépassement ou surchauffe (Figure 33). La température de référence est égale à 27°C, en accord avec la réglementation Belge. Seulement deux bureaux présentent des valeurs très élevées par rapport à la moyenne enregistrée dans le bâtiment (100-150h). D'après le rapport, cette différence s'explique par quatre raisons que sont le positionnement des sondes, le choix de l'occupant du bureau (ambiance plutôt chaude), le rayonnement solaire plus important (Bureau 2^{ème} étage) et un transfert thermique entre le niveau en sous-sol et le premier étage (Bureau premier étage).

² HYBVENT. Hybrid Ventilation and Control Strategies in the Annex 35 Case Studies.

³ AIE. Agence Internationale de l'Energie

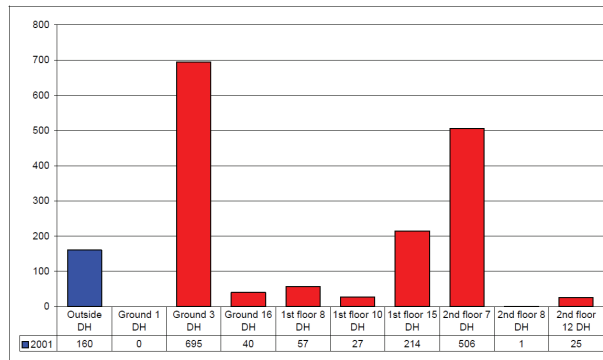


Figure 33. Nombre d'heures de surchauffe

Pour la qualité de l'air, elle a été évaluée uniquement avec le CO₂. Il est important de bien faire la différence car le CO₂ est plutôt un marqueur qui démontre le niveau de confinement d'une pièce. Une relation entre qualité de l'air et CO₂ peut être obtenue mais tout dépend des polluants présents dans le bâtiment. Le résultat du suivi est montré dans la Figure 34 :

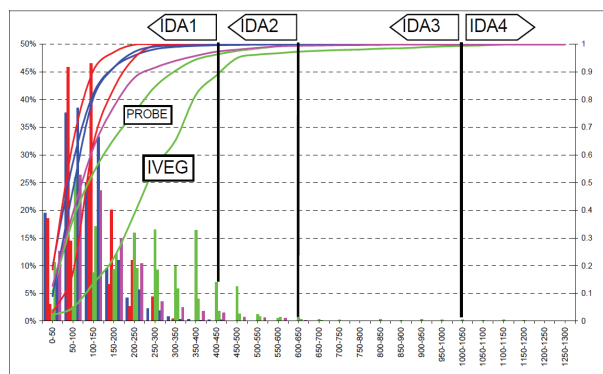


Figure 34. Fréquence concentration CO2

En général les valeurs enregistrées se situent en-dessous de 1000 ppm, cela laisse penser que le renouvellement d'air est suffisant. Ce bâtiment est un des exemples concrets où les performances énergétiques peuvent être atteintes tout en assurant un bon confort intérieur.

4.3 Rijkswaterstaat.



Figure 35. Rijkswaterstaat

4.3.1 Description

Il est situé au Pays-Bas dans la ville de Terneuzen. C'est un bâtiment de bureau construit dans les années 2000, qui possède une surface totale de plancher de 1750 m², environ 60 personnes travaillent à l'intérieur, occupant ainsi une surface de 30 m² par personne. Ce bâtiment (Figure 35) est ventilé 100% du temps avec un système de ventilation naturelle.

4.3.2 Principe de ventilation

Il a été conçu intégralement pour fonctionner avec une ventilation naturelle. Chaque occupant peut gérer l'ouverture de la fenêtre. Des protections solaires, de type casquette, sont installés en façade pour gérer les apports

solaires. La stratégie de fonctionnement de la ventilation est par tirage thermique, des ouvertures en façade (fenêtres) et une sortie en toiture permettent d'assurer le bon renouvellement d'air du bâtiment. La Figure 36 montre ce principe :

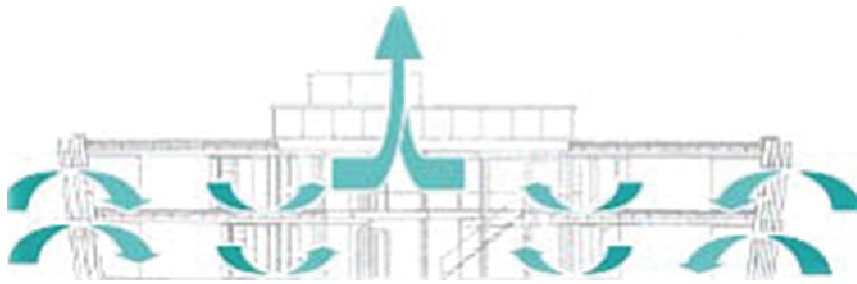


Figure 36. Principe de ventilation - Effet cheminée

4.3.3 Stratégie de régulation

Les ouvertures sont contrôlées de deux façons. La première est manuelle : les occupants ont la possibilité d'ouvrir ou de fermer les fenêtres, ceci se passe essentiellement pendant la mi-saison et l'été. L'hiver, le système de gestion du bâtiment gère l'ouverture des fenêtres afin de garantir le débit strictement nécessaire pour bien ventiler le bâtiment selon la direction et la vitesse du vent. Une cheminée en toiture permet de réguler le débit d'air dans le bâtiment (Figure 37).



Figure 37. Système d'extraction

4.3.4 Suivi du bâtiment

Le suivi de ce bâtiment a été réalisé dans le cadre du projet ADVENT⁴. Il a été fait pendant l'hiver 2000 et l'été 2001. Des mesures du confort thermique ont été réalisées dans 7 endroits du bâtiment. Les concentrations de CO₂ ont été suivies pendant 4 semaines de l'hiver 2001.

4.3.5 Résultats et conclusions

La consommation totale en énergie primaire du bâtiment enregistrée pendant la période de mesure a été de 87 kWhEP/m²an tous usages confondus. La répartition est présentée dans la Figure 38:

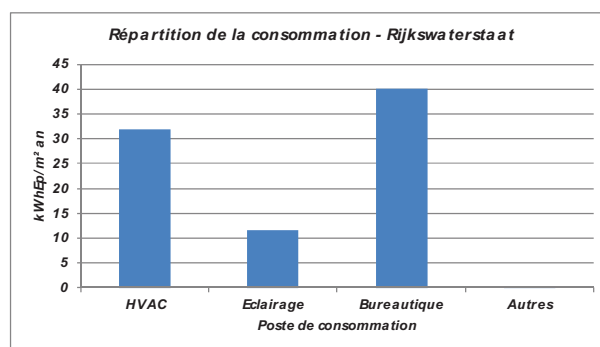


Figure 38. Répartition de la consommation

⁴ Programme Européen qui avait comme objectif de démontrer les économies d'énergie qui pourraient être faites pour la qualité de l'air intérieur et le confort thermique acceptable dans différentes régions climatiques européennes. www.buildingadvent.com

Nous constatons clairement que les consommations liées au chauffage sont quasi équivalentes à la consommation bureautique, le fait d'être ventilé naturellement augmente considérablement les déperditions par l'air, ce qui provoque une consommation en chauffage importante. Vis-à-vis du confort thermique, le résultat est très intéressant. 72% de satisfaits en hiver et 62% en été. Pendant la période de mesure il n'y a eu aucune surchauffe enregistrée. L'inertie associée à une sur ventilation nocturne a permis de n'avoir recours à aucun système de climatisation. Concernant les concentrations de CO₂, la concentration maximale enregistrée a été de 850 ppm. Les résultats observés permettent de conclure quant à l'utilisation de la ventilation naturelle. Ce bâtiment est situé sur un terrain isolé qui permet le bon fonctionnement de la ventilation, les taux de renouvellement d'air sont assez importants permettant ainsi la bonne évacuation du CO₂ et probablement d'autres types de polluants, le confort d'été reste un peu sa faiblesse, 62% de satisfaction ce qui est un peu faible mais reste intéressant.

4.4 NREL, National Renewable Energy Laboratory.



Figure 39. NREL

4.4.1 Description

Situé aux Etats-Unis, au Colorado, ce bâtiment (Figure 39) est un exemple des solutions novatrices qui permettent de réduire les consommations liées à la ventilation. C'est le siège du Laboratoire National de l'Énergie Renouvelable (NREL). Environ 800 personnes y travaillent occupant une surface totale de 20.300 m² soit environ 25 m² par personne. Ce bâtiment a été construit en 2008, il a une forme en « U » orienté Nord - Sud. Ce bâtiment fait partie des projets étudiés dans le cadre de la tâche 40 de l'Agence Internationale de l'Énergie⁵. Pour l'instant il n'y a pas de données mesurées concernant, les températures, concentrations de CO₂, mais ce projet se démarque par son système de ventilation et ses performances énergétiques.

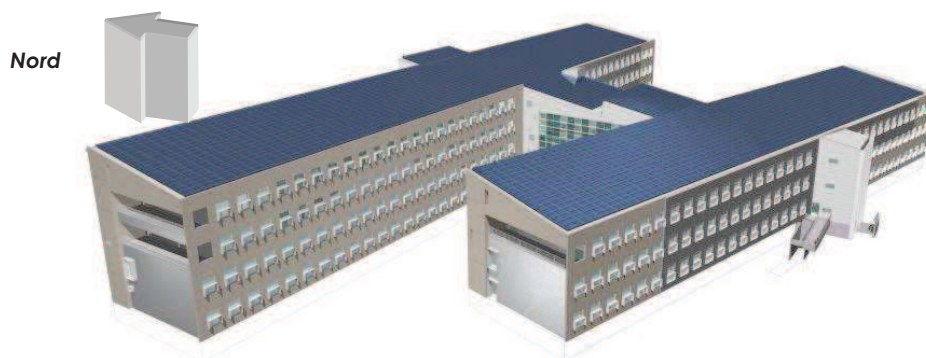


Figure 40. Vue 3D du bâtiment

⁵ L'objectif du groupe est d'étudier, les bâtiments actuels à zéro énergie ou près de zéro énergie, afin de développer une compréhension commune, un cadre international harmonisé des définitions, des outils, des solutions innovantes et des lignes directrices de l'industrie. <http://task40.iea-shc.org/>

4.4.2 Principe de ventilation

Deux systèmes de ventilation équipent ce bâtiment. Le premier, mécanique, permet d'assurer le débit de ventilation en hiver. Un mur capteur placé dans la façade sud préchauffe l'air extérieur, ensuite celui-ci est soufflé et distribué par le sol. L'appoint est assuré par un plancher chauffant. Les Figure 41 et Figure 42, décrivent le fonctionnement de ce système.

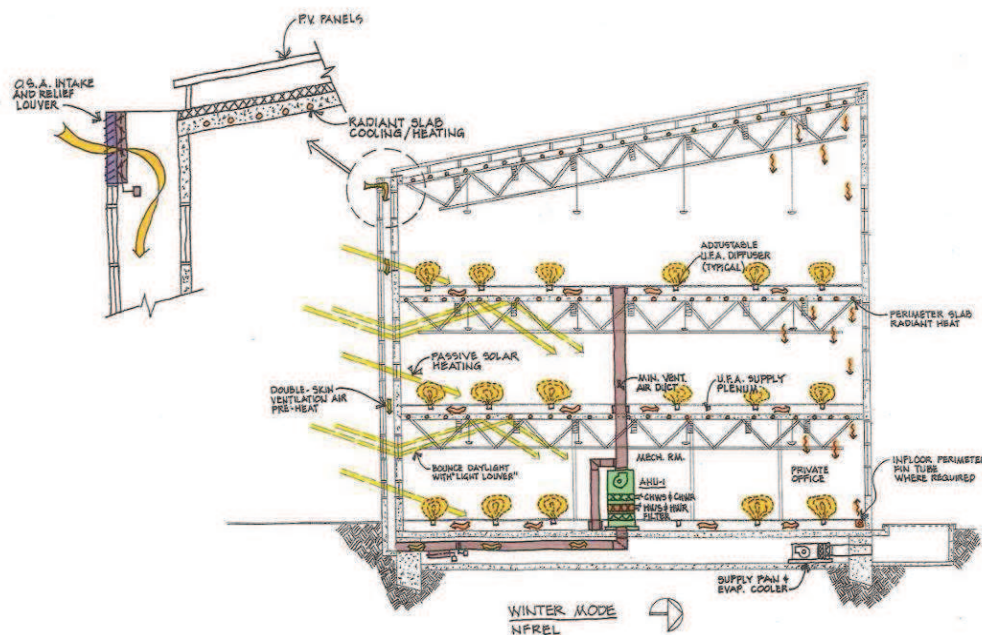


Figure 41. Mode Hiver

Pour le mode estival, deux systèmes permettent d'assurer le rafraîchissement du bâtiment. Une ventilation naturelle de type « traversant » assure le débit de ventilation nécessaire. Le rafraîchissement est fait par le biais du plancher. L'air extérieur est capté et envoyé dans le sous-sol, l'air y est rafraîchi naturellement par un « labyrinthe thermique ». Ensuite il est soufflé par le sol dans chaque niveau.

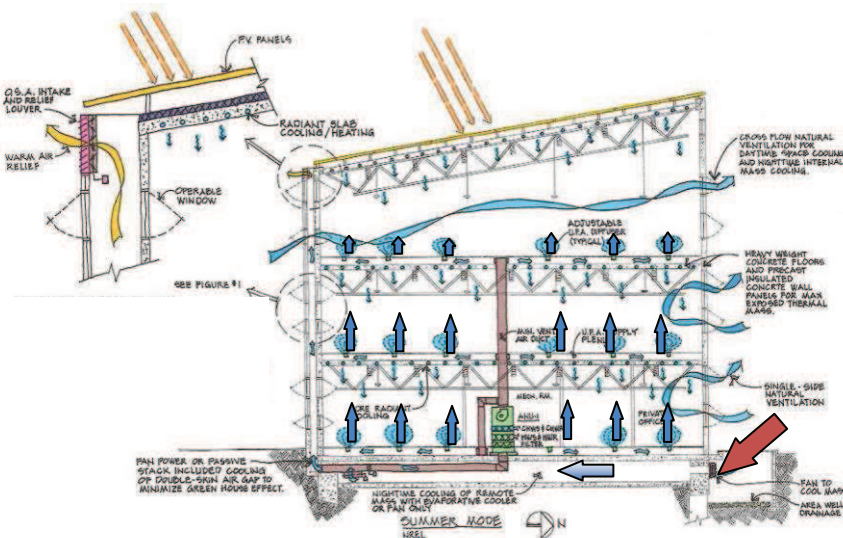


Figure 42. Mode été

Ce « labyrinthe thermique » est constitué d'une masse thermique très importante, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de rafraîchissement. Pendant la nuit, l'air extérieur est capté en partie haute, il est envoyé au labyrinthe et de façon naturelle l'air circule tout au long de celui-ci, figure 44 à gauche. La capacité de rafraîchissement stockée dans cet endroit est donc très importante, permettant ainsi, la journée (Figure 43 à droite), de refroidir l'air extérieur, pour souffler un air plus frais à l'intérieur du bâtiment.

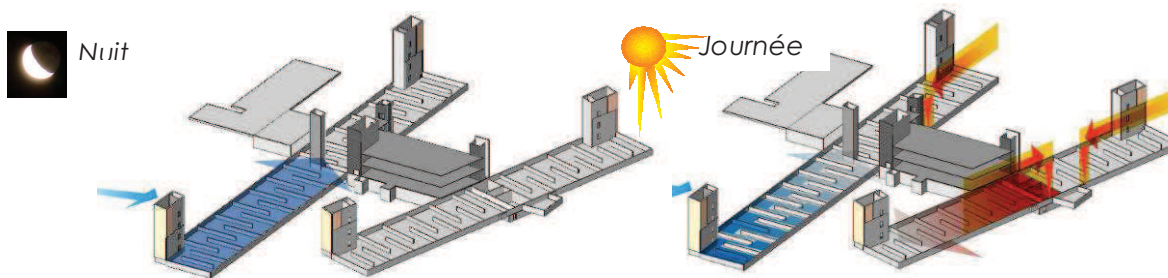


Figure 43. Labyrinthe thermique

4.4.3 Stratégie de régulation

L'ouverture et la fermeture des fenêtres ainsi que le système de soufflage par le sol et la sur ventilation nocturne sont contrôlés par le système de gestion propre au bâtiment. En complément l'utilisateur a l'option de modifier l'ouverture ou la fermeture des fenêtres, comme le montre la Figure 44. Les débits de ventilation mis en place ont été fixés pour dépasser de 30% la norme ASHRAE 62.1. Un système de ventilation mécanique souffle de l'air au niveau du sol, avec les fenêtres, les usagers peuvent augmenter les débits de ventilation.

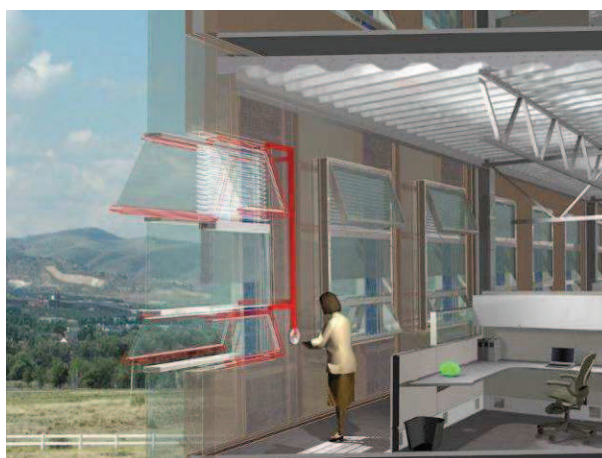


Figure 44. Mode de gestion manuel de fenêtres

4.4.4 Suivi du bâtiment

Pour l'instant il n'y a pas de données de suivi pour ce bâtiment. Il fait partie des bâtiments étudiés dans le cadre de l'annexe 52 de l'IEA, les données ne sont pas disponibles pour le moment. Malgré cela, quelques mesures ont été réalisées pour assurer la qualité de l'air du bâtiment. Tous les matériaux utilisés pour la construction du bâtiment ont été surveillés de près afin de garantir des émissions faibles de COV. Les matériaux contenant du formaldéhyde ont été proscrits. Toutes les Centrales de Traitement d'Air sont équipées d'un filtre à 85% d'efficacité pour le traitement des poussières. Chaque occupant a la possibilité de réguler la température de chauffage et de rafraîchissement. Le coût total est de 57M\$ qui équivaut à 2100€/m². Ce bâtiment est certifié LEED® Platinum.



Figure 45. Vu étage - Open espace

4.4.5 Résultats et conclusions

La consommation totale enregistrée pour ce bâtiment a été de 112 kWh/m² an. Ce bâtiment est placé comme bâtiment à zéro énergie voire à énergie positive car une production photovoltaïque en toiture et un parc éolien permettent de compenser sa consommation pour atteindre le niveau Zéro Énergie. La répartition des consommations est montrée dans le Tableau 11:

Tableau 11. Bilan énergétique NREL

Poste	kWhEP/m ² an
Chauffage	18.8
Climatisation	4.05
Éclairage	13.02
Ventilateurs et pompes	6.8
Bureautique	26.05
Eau chaude sanitaire	0.43
Datacenter	20.8
TOTAL	112

Ses performances énergétiques sont très intéressantes. Le travail mené pendant la conception, choix des matériaux, systèmes de ventilation, chauffage, rafraîchissement, a permis d'atteindre des niveaux de consommations très faibles. Tous les aspects ont été étudiés et même si il n'y a pas aujourd'hui des informations complètes du suivi du bâtiment il est quasi certain que le résultat final va être très intéressant.

C'est un bâtiment exemplaire en termes d'efficacité énergétique, au niveau technique, puisqu'il utilise des techniques assez innovantes et en termes de confort. La ventilation naturelle est utilisée comme appoint pour améliorer les conditions de confort des usagers, le fonctionnement manuel permet d'impliquer l'utilisateur dans le fonctionnement du bâtiment (critère LEED). C'est un cas qui démontre l'intégration des critères de confort avec la performance énergétique, les consommations restent faibles par rapport à des résultats en termes de satisfaction probablement intéressants.

4.5 Aras Chill Dara Building



Figure 46. Aras Chill Dara

4.5.1 Description

L'Aras Chill Dara Building (Figure 46), est un bâtiment situé en Irlande dans la ville de Naas, il a été construit en 2006. Il a obtenu le prix du « Royal Institute of British Architects (RIBA) European Architecture » pour sa conception et sa qualité environnementale. Il possède une surface totale de 12.500 m² distribuée sur 4 niveaux. Environ

400 personnes travaillent de 9 à 17h du Lundi au Vendredi. L'orientation est Est-Ouest afin de mieux profiter des apports solaires, comme le montre la Figure 47. Ce bâtiment a été étudié et suivi dans le cadre du programme ADVENT⁶ est financé par le « Intelligent Energy Europe ». Il abrite le Kildare County Council.

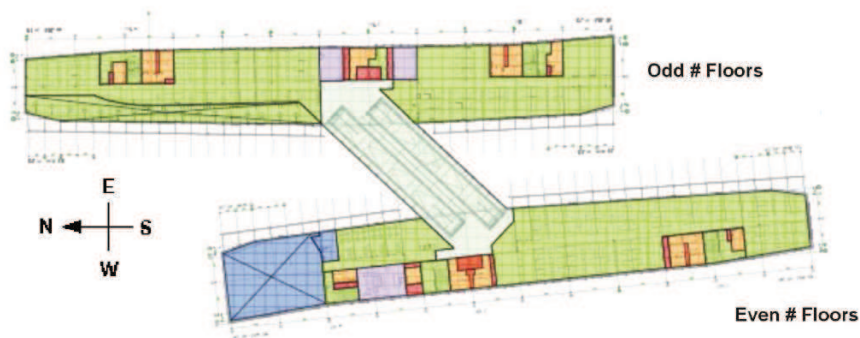


Figure 47. Orientation

4.5.2 Principe de ventilation

La plupart du bâtiment est ventilée naturellement (zones vertes, Figure 47), seules les salles de réunions et les locaux spécifiques dont la charge interne est trop importante possèdent un système de ventilation mécanique. La nuit, pendant la période estivale, une sur ventilation naturelle nocturne fait partie du système de ventilation. Elle a été associée à des plafonds nus en béton. Des faux plafonds acoustiques suspendus ont été mis en œuvre, mais uniquement localement pour faciliter la mise en œuvre de l'inertie des planchers, Figure 48.



Figure 48. Plafonds du bâtiment

4.5.3 Stratégie de ventilation

Le principe de ventilation est naturel traversant par ouverture de fenêtres, Figure 49. Deux types de contrôles sont disponibles, le premier régule et utilise des entrées d'air en partie haute qui à la fois sont régulées en fonction de la concentration de CO₂ et de la température (max 25°C). Des ouvertures placées en partie basse de la façade sont contrôlées de manière manuelle.

⁶ Advanced Ventilation Technologies

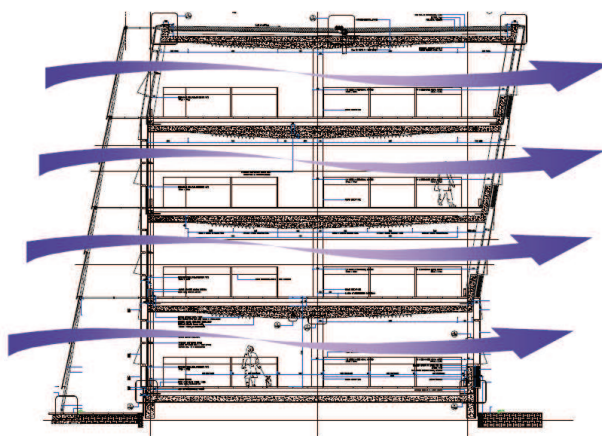


Figure 49. Schéma Ventilation Naturelle

4.5.4 Suivi du bâtiment

Le suivi de ce bâtiment a été fait dans le cadre du programme ADVENT. Les consommations énergétiques, le confort thermique et les concentrations de CO₂ ont été étudiés dans ce programme. Toutes les données ont été récupérées par mesure concrète car le bâtiment est équipé d'un système de surveillance et contrôle, GTC.

4.5.5 Résultats et conclusions

Concernant la consommation du bâtiment, elle est de 136 kWhEP m²/an. La répartition est présentée dans la Figure 50:

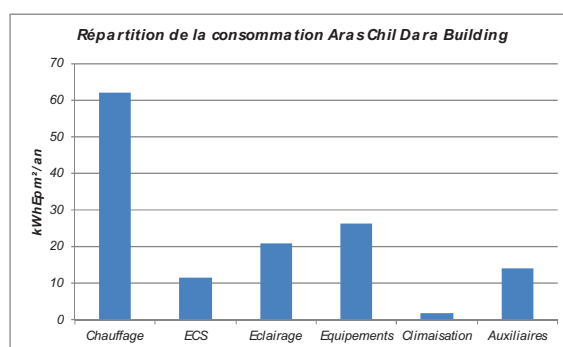


Figure 50. Répartition de la consommation

La consommation la plus importante est dédiée au chauffage, ce qui est tout à fait logique dans un bâtiment ventilé naturellement dans un climat avec des hivers longs. Au niveau du CO₂ les concentrations maximales enregistrées n'ont pas dépassées les 750 ppm, ce qui démontre le faible niveau de confinement dans le bâtiment. Environ 30 m² sont disponibles par personne dans le bâtiment. Si on regarde les enquêtes de satisfaction, celles-ci ont données un taux de satisfaction de 66% en hiver et 56% en été. Ces résultats sont probablement liés au faible nombre de réponses récoltées mais aucune explication n'a été donnée.

Nous avons présenté quelques cas des bâtiments exemplaires. Ils ont tous été construits dans des périodes différentes, ce qui permet de dire que les questions liées au confort et à l'efficacité énergétique faisait déjà partie des réflexions dans beaucoup de pays. Les suivis réalisés sont plutôt orientés vers le confort thermique et les concentrations de CO₂, nous n'avons pas trouvé de données vis-à-vis de la QAI. Une particularité dans ces bâtiments est le recours à la ventilation naturelle même dans des régions où les températures sont plus faibles en hiver. Cette technique permet de faire un gain intéressant au niveau énergétique et de renouveler l'air de manière plus importante.

Dans tous les cas sauf dans le bâtiment de NREL, les suivis ont été réalisés dans le cadre des programmes internationaux. Le bâtiment du NREL est différent puisqu'il a été construit récemment, il a fait l'objet d'une certification environnementale (LEED), le niveau qu'il a obtenu (Platinum) est le plus haut. Le suivi qui a été fait dans ce bâtiment fait partie des exigences LEED. Cette démarche ainsi que les BREEAM et le HQE, intègrent dans leurs définitions la QEI. Actuellement c'est le seul moyen de vérifier la qualité de la conception des bâtiments. Nous poursuivons avec leur présentation.

5. LES CERTIFICATIONS ENVIRONNEMENTALES ET LA QEI

La RT ne définit pas de valeurs cibles pour la qualité des environnements intérieurs puisqu'elle comporte une seule valeur conventionnelle de chauffage à 19°C qui ne correspond pas à une situation de confort comme nous avons pu le constater précédemment, et qu'elle n'aborde pas le problème de la qualité de l'air. La norme NF 15251, que nous avons présentée précédemment définit des critères de confort en fonction de catégories, mais il n'existe pas en France une obligation quant à cette norme. Une autre approche pour qualifier les environnements intérieurs réside dans les certifications environnementales LEED®, BREEAM® et HQE® qui intègrent dans leurs définitions des critères de confort et de QEI.

5.1 Certification environnementale LEED (USGBC, 2014)

Le Leadership in Energy and Environmental Design LEED, est un système nord-américain de standardisation de bâtiments à haute qualité environnementale créé par le US Green Building Council en 1998. Il établit 4 niveaux de certification, Certifié (40 points), Argent (50 points), Or (60 points) et Platine (80 points). LEED fournit aux propriétaires d'immeubles et aux opérateurs un cadre pour identifier et mettre en œuvre la construction et l'exploitation des bâtiments verts. La certification LEED fournit des services indépendants, la vérification par un tiers que le bâtiment a été conçu et construit en utilisant des stratégies visant à atteindre la haute performance dans des domaines clés (USGBC, 2014). Le tableau 12 présente les critères :

Tableau 12. Crédits attribués dans la démarche LEED

Critère	Bâtiments anciens	Bâtiments neufs
Aménagement écologique des sites.	26	26
Gestion efficace de l'eau.	14	10
Énergie et atmosphère.	35	35
Matériaux et ressources.	10	14
Qualité des environnements intérieurs	15	15
Innovation et processus de design.	6	6

Le fait d'être un label soumis aux normes américaines ASTM, ASHRAE et ANSI le rend difficilement applicable en France. Le choix des cibles est fait par le concepteur, aucune exigence n'est imposée par ce label. Par exemple, il est possible de cibler les « Aménagement écologique des sites » et « Énergie et atmosphère » pour atteindre ainsi les 61 points possibles, pour un bâtiment neuf, et obtenir la certification « GOLD ».

5.2 Certification environnementale BREEAM (BREEAM, 2014)

Créée au Royaume-Uni en 1990, c'est le premier référentiel au monde. Il est octroyé par le « Building Research Establishment ». Seulement deux référentiels sont applicables en France, le « BREEAM Europe Commercial » pour tous les bâtiments tertiaires et le « BREEAM Bespoke International » pour les opérations mixtes. BREEAM est une méthode d'évaluation environnementale et un système de notation pour les bâtiments. Avec 200.000 bâtiments certifiés BREEAM et plus d'un million enregistrés pour l'évaluation c'est la référence en terme de certification. La certification BREEAM est basée sur 9 critères, chacun d'entre eux attribue un nombre de points, le maximum possible est de 100 points (tableau 13) :

Tableau 13. Crédits BREEAM

CIBLE	Crédits
Management et gestion	15
Santé et confort	15
Énergie	25
Transport	
Eau	
Matériaux	10
Terrain	15
Écologie	
Pollution	10

La certification est accordée par pondération des points, la note est donnée en pourcentage :

Tableau 14. Niveau de notation BREEAM

NOTE	ETOILE	VALEUR
PASS	*	30%
GOOD	**	45%

VERY GOOD	***	55%
EXCELLENT	****	70%

De la même manière que pour le LEED, le choix des cibles est optionnel, l'obtention des points se fait en fonction des critères choisis. Il est possible d'obtenir une certification « Excellent » en se focalisant sur une thématique particulière.

5.3 La certification HQE

La démarche HQETM ou Haute Qualité Environnementale a pour objectif d'améliorer la qualité environnementale des bâtiments neufs et existants. Elle offre des ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement, évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés possibles. C'est une démarche d'optimisation multicritère qui s'appuie sur une donnée fondamentale : un bâtiment doit avant tout répondre à un usage et assurer un cadre de vie adéquat à ses utilisateurs. 14 cibles permettent de structurer la réponse technique, architecturale et économique aux objectifs du maître d'ouvrage.

Il s'agit donc d'une démarche volontaire proposée aux maîtres d'ouvrages qui souhaitent valoriser leurs actions et offrir à leurs divers interlocuteurs une assurance quant aux performances obtenues en matière de qualité environnementale : ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement, évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés possibles. La certification HQE existe pour les bâtiments neufs comme pour les bâtiments existants, dans les domaines des bâtiments tertiaires, de la maison individuelle et du logement collectif et pour les équipements sportifs :

« NF Bâtiments Tertiaires » (Certivea)

« NF Maison Individuelle » (Cerquami)

« NF logement – Démarche HQE » (Cerquami)

« NF équipements Sportifs » (Certivea)

La démarche HQE est composée de 14 cibles, divisées en 4 groupes, Eco-construction, Gestion, Confort et Santé. Dans le tableau 15, nous présentons l'organisation :

Tableau 15. Cibles démarche HQE

Critères	CIBLES
Eco-construction	Cible 1. Relation du bâtiment avec son environnement immédiat
	Cible 2. Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction
	Cible 3. Chantier à faible impact environnemental
Gestion	Cible 4. Gestion de l'énergie
	Cible 5. Gestion de l'eau
	Cible 6. Gestion des déchets d'activité
	Cible 7. Maintenance, pérennité des performances
Confort	Cible 8. Confort hygrothermique
	Cible 9. Confort acoustique
	Cible 10. Confort visuel
	Cible 11. Confort olfactif
Santé	Cible 12. Qualité sanitaire des espaces
	Cible 13. Qualité sanitaire de l'air
	Cible 14. Qualité sanitaire de l'eau

Chaque cible est divisée en trois niveaux, base, performant, très performant. Pour obtenir la certification il faut respecter au minimum 7 cibles de niveau de base, 4 cibles du niveau performant, et 3 cibles du niveau très performant.

5.4 Comparatif entre certifications

De manière générale, les trois démarches intègrent les notions de QEI mais le seul inconvénient est que cela reste volontaire et parfois difficile à mettre en œuvre pour l'obtention de crédits. Le tableau 16 résume les principaux critères de la QEI pour chaque label :

Tableau 16. Nombre de points attribués en fonction de critères de confort

Critère	LEED	BREEAM	HQE
Confort hygrothermique	3	3	1 (3)

Confort visuel	3	6	1 (3)
Confort Acoustique	-	1	1 (3)
Qualité de l'air	9	3	1 (3)

De manière générale, toutes les démarches intègrent les critères de la QEI. Ce sont les obligations dans chacun des crédits qui varient. Par exemple, dans la démarche LEED, nous observons que la QAI est prise en compte de manière plus importante, au total 9 obligations doivent être respectées pour que les crédits soient attribués. La démarche BREEAM est plus axée sur le confort visuel. La démarche HQE définit une cible pour chaque critère, la différence est que chaque cible est composée de trois niveaux de performance. Au total, 12 obligations seraient nécessaires pour obtenir la totalité des crédits.

Ces labels sont devenus des standards en matière de performance environnemental, ils sont très attractifs du point de vue économique car ils donnent une valeur ajoutée au bâtiment, mais il n'existe aucune obligation, le maître d'ouvrage a le choix des critères, un bâtiment peut avoir un bon niveau de certification mais il est difficile de vérifier sa performance réelle en termes de la QEI.

6. CONCLUSION

Dans une première partie, nous avons défini la QEI et nous avons présenté les critères de confort. Des plages de valeurs ont été présentées. Nous avons montré quelques cas d'étude de bâtiments de bureaux où les critères de la QEI ont été utilisés partiellement. Pour terminer, nous avons présenté des méthodes de certification environnementale qui intègrent la QEI dans leurs critères mais qui présentent quelques inconvénients du fait du caractère optionnel du choix des cibles retenues pour l'évaluation.

Concevoir des espaces confortables présente un réel intérêt économique pour une entreprise. L'aspect énergétique est important, mais la productivité peut parfois coûter plus chère que l'économie réalisée en termes de facture énergétique. En revanche, si ce gain en productivité, même s'il peut être rentabilisé, implique une surconsommation trop importante, il perd un peu d'intérêt. Le contexte climatique actuel fait que la réduction des émissions de GES et de la dépendance énergétique passe en premier.

Nous avons vu avec les études de cas, que combiner efficacité énergétique et confort peut être possible. Dans les bâtiments présentés, les performances en termes de consommation et du confort sont assez intéressantes, le suivi fait au niveau du confort a permis de démontrer partiellement, que confort peut être associé à efficacité énergétique.

De manière générale, peu de données existent sur les bâtiments de bureaux. Quelques programmes sont en cours mais les résultats ne sont pas toujours disponibles, comme le programme OfficAir, financé par l'Union Européen qui fournira une base de données sur la QEI des bâtiments de bureaux (Officair, 2013) et la tâche 40 de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2010) qui mettra en évidence les techniques de construction et conception de bâtiments de bureaux à « Zéro Énergie ».

Dans le chapitre suivant, nous présentons la Tour Elithis, premier bâtiment de bureaux à énergie positive de France. Ses performances en termes énergétiques sont remarquables mais aucun suivi en termes de confort et de la QAI n'avait été fait. Nous avons donc mis en place des campagnes de mesure du confort thermique et de la QAI pour créer notre propre base de données.

CHAPITRE III.

LA TOUR ELITHIS, PRESENTATION ET SUIVI EXPERIMENTAL

Pour notre travail de recherche nous avons pris comme référence La Tour Elithis, puisqu'elle a été le premier bâtiment de bureaux à énergie positive de France. Dans une première partie, nous présentons de manière non exhaustive le fonctionnement du bâtiment. Dans une deuxième partie, nous présentons le bilan énergétique des trois premières années, et pour terminer nous présentons le suivi du confort des occupants ainsi que les mesures de caractérisation de la qualité de l'air que nous avons menées.

1. DESCRIPTION GÉNÉRALE

La Tour Elithis, inaugurée en mars 2009 (Figure 51), est le premier bâtiment de bureaux à énergie positive construit en France. C'est-à-dire, qu'il produit plus d'énergie que celle qu'il consomme. Seuls les usages réglementaires sont compensés (chauffage, ventilation, climatisation, éclairage et Eau chaud sanitaire). Pour rappel, seulement la partie bureau est considérée. Le rez de chaussé (RDC) et le premier étage (N+1) ne sont pas considérés dans le bilan puisque les activités qui y sont réalisées ne sont pas prises en compte dans le périmètre du bureau. (Restauration et activité médicale).

Ce bâtiment est situé à Dijon, France. Il est composé de 9 niveaux et 1 niveau technique (Centrale de traitement d'air, Groupe Froid, Tourelles de ventilation, récupération d'eau de pluie, etc.). Il mesure 33,5 mètres de haut. 4 niveaux sont occupés par la Société d'Ingénierie, Elithis (6^{ème} au 9^{ème}), le 5^{ème} étage est occupé par une société de consulting, le 4^{ème} par l'ADEME (Agence Départementale pour la Maîtrise de l'Énergie), le 3^{ème} par un cabinet dentaire, le 2^{ème} par Bourgogne Bâtiment Durable⁷.

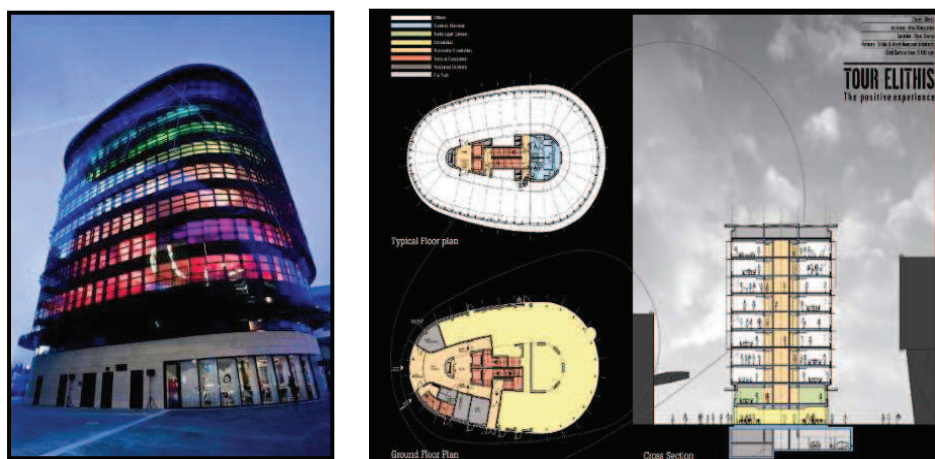


Figure 51. Tour Elithis – Govin Sorel – Arte Charpentier

L'objectif de ce projet était de combiner l'esthétique, l'intégration urbaine, la performance énergétique et environnementale avec un coût standard (Cout total de 1400 € par m², photovoltaïque inclus). L'utilisation de moyens passifs et des ressources naturelles a été une priorité afin de réduire l'impact environnemental. Pour obtenir un confort thermique et visuel dans le bâtiment, le soleil est la principale source d'énergie. Une surface vitrée de 75% de la façade permet au bâtiment d'être chauffé de façon naturelle et assure un confort visuel optimal, grâce à un control permanent du rayonnement solaire. La structure du bâtiment est composée d'un "noyau central" (Figure 52) en béton et des façades en bois isolées avec de la ouate de cellulose, matière 100% recyclée.

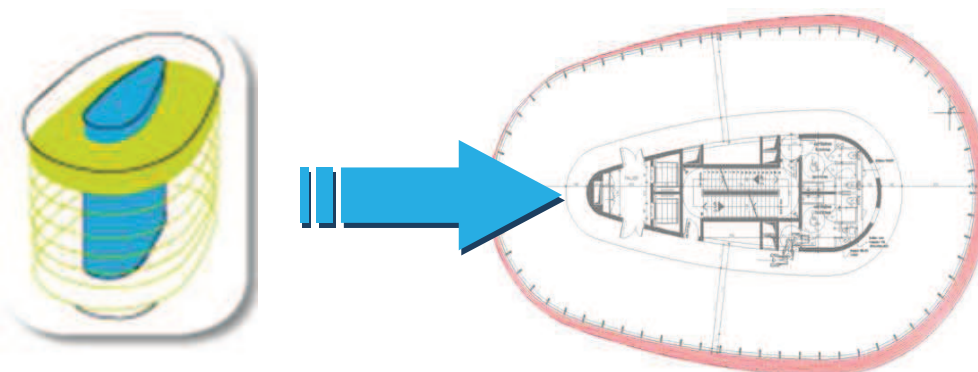


Figure 52. Noyau Central

Le tableau 17 résume les principales caractéristiques du bâtiment :

⁷ Bourgogne Bâtiment Durable est une plateforme régionale de ressources et de dialogue sur la thématique de la construction durable. <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/>

Tableau 17. Caractéristiques Tour Elithis

U Fenêtre	1.1 W/(m ² K)
g Fenêtre	0.4
U Mur extérieur	0.32 W/(m ² K)
U Plancher	0.39 W/(m ² K)
U Toiture	0.22 W/(m ² K)
Surface moyenne occupée par personne	15 m ² /personne
Nombre d'heure d'utilisation	2450 h
Température extérieure de base (hiver)	-11°C
Conditions extérieures de base (été)	32°C / 38%
Degrés jours	2 650 Degrés jour (base 18°C)

Afin d'améliorer le confort thermique et visuel, tous les niveaux de la Tour Elithis ont été conçus dans un plan de distribution ouverte, appelé aussi « open space » (Figure 53). Cette solution donne la possibilité d'améliorer la distribution de l'air et augmente l'efficacité de l'éclairage naturel.



Figure 53. Étage Tour Elithis - Open space

1.1 Les systèmes de ventilation

Pour assurer la ventilation du bâtiment deux systèmes ont été intégrés dans le bâtiment. Pendant les périodes hivernales et estivales, un système de ventilation double flux permet de ventiler le bâtiment de manière continue pendant les heures d'occupation et un échangeur de chaleur permet de préchauffer l'air en hiver. En été un « by-pass » est prévu. La diffusion de l'air se fait par le biais des « poutres climatiques » intégrées aux plafonds (Figure 54). Chaque étage est équipé de 32 poutres climatiques.



Figure 54. Poutres climatiques

Ce système permet d'assurer la ventilation hygiénique réglementaire (25 m³/h personne) et en même temps de souffler de l'air chaud pour le chauffage ou de l'air frais pour le rafraîchissement du bâtiment, si nécessaire.



Figure 55. Poutre de climatisation - SWEGON

Une centrale de traitement d'air envoie l'air primaire, pris à l'extérieur, jusqu'au plénum de la poutre via un réseau de gaines, créant une surpression. Le plénum compte une série de barres coulissantes dotées d'une rangée de buses de tailles diverses (figure 56). La surpression créée dans le plénum envoie l'air primaire dans les buses à une vitesse relativement élevée. Cette diffusion produit une dépression dans le compartiment situé au-dessus de l'échangeur de chaleur intégré (batterie). Cette dépression aspire l'air ambiant dans l'échangeur (induction), qui lui fait subir le traitement voulu (chauffage/rafraîchissement).

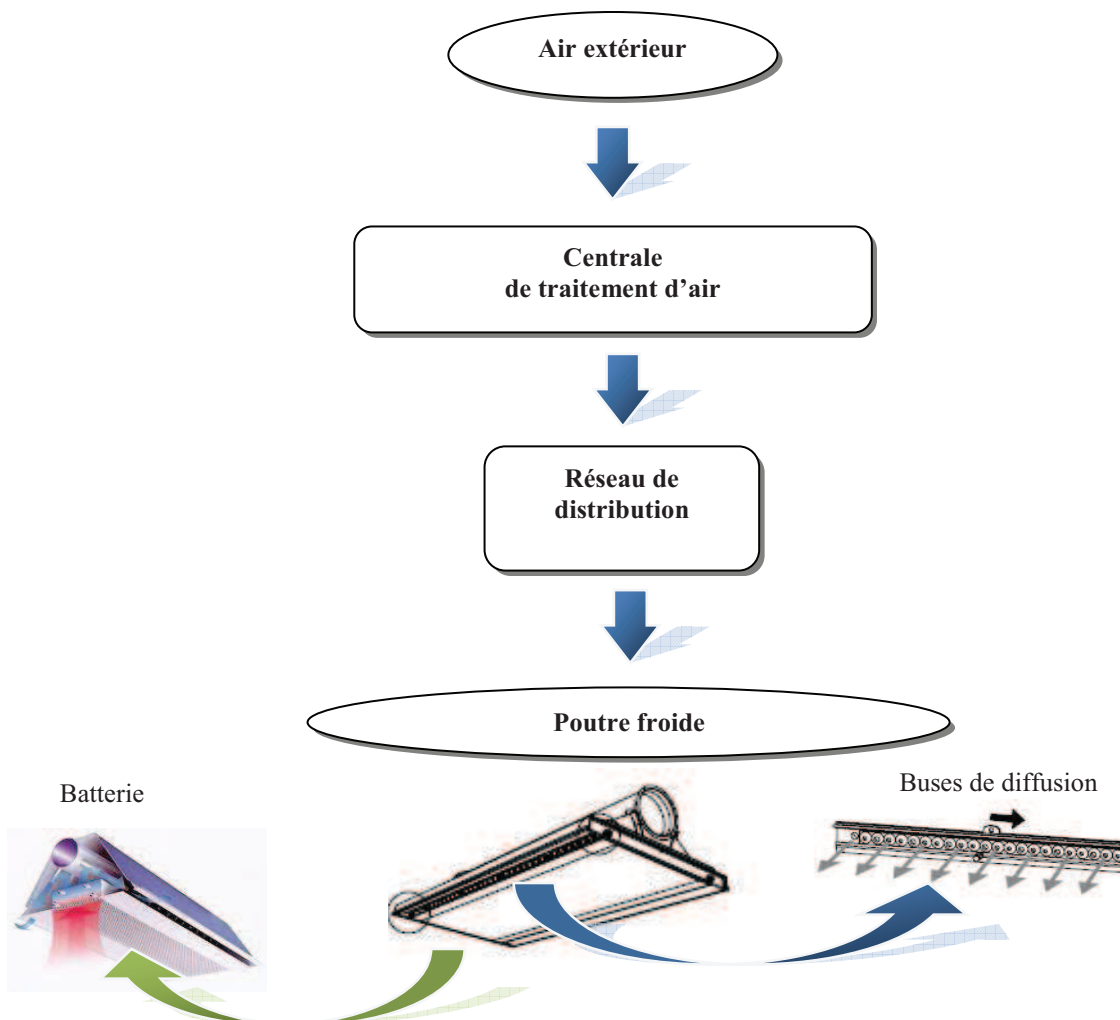


Figure 56. Fonctionnement des poutres climatiques

Dans un deuxième temps, quand les conditions d'hygrométrie et de température le permettent, une ventilation appelée « triple flux » permet de ventiler le bâtiment par le biais d'entrées d'air en façade (figure 57). Le principe général est celui d'une ventilation simple flux.

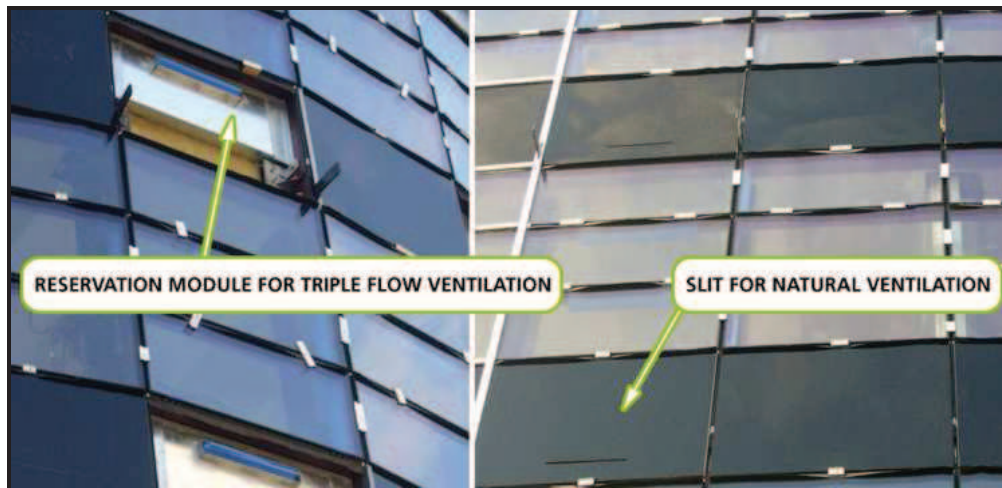


Figure 57. Ventilation "Triple flux"

Au printemps et en automne ou lorsque la température extérieure et l'hygrométrie le permettent ($T^{\circ}C > 10$, $H\% \text{ Ext} < H\% \text{ Int}$), l'air extérieur à cet instant est une source gratuite pour maintenir le bâtiment en-dessous de $26^{\circ}C$. La ventilation double flux est arrêtée, les entrées d'air en façade sont ouvertes (1) et l'extraction de l'air est assurée par un ventilateur basse pression (2) (figure 58). Au total, 32 entrées d'air par étage équipent le bâtiment permettant ainsi d'assurer la ventilation du bâtiment.

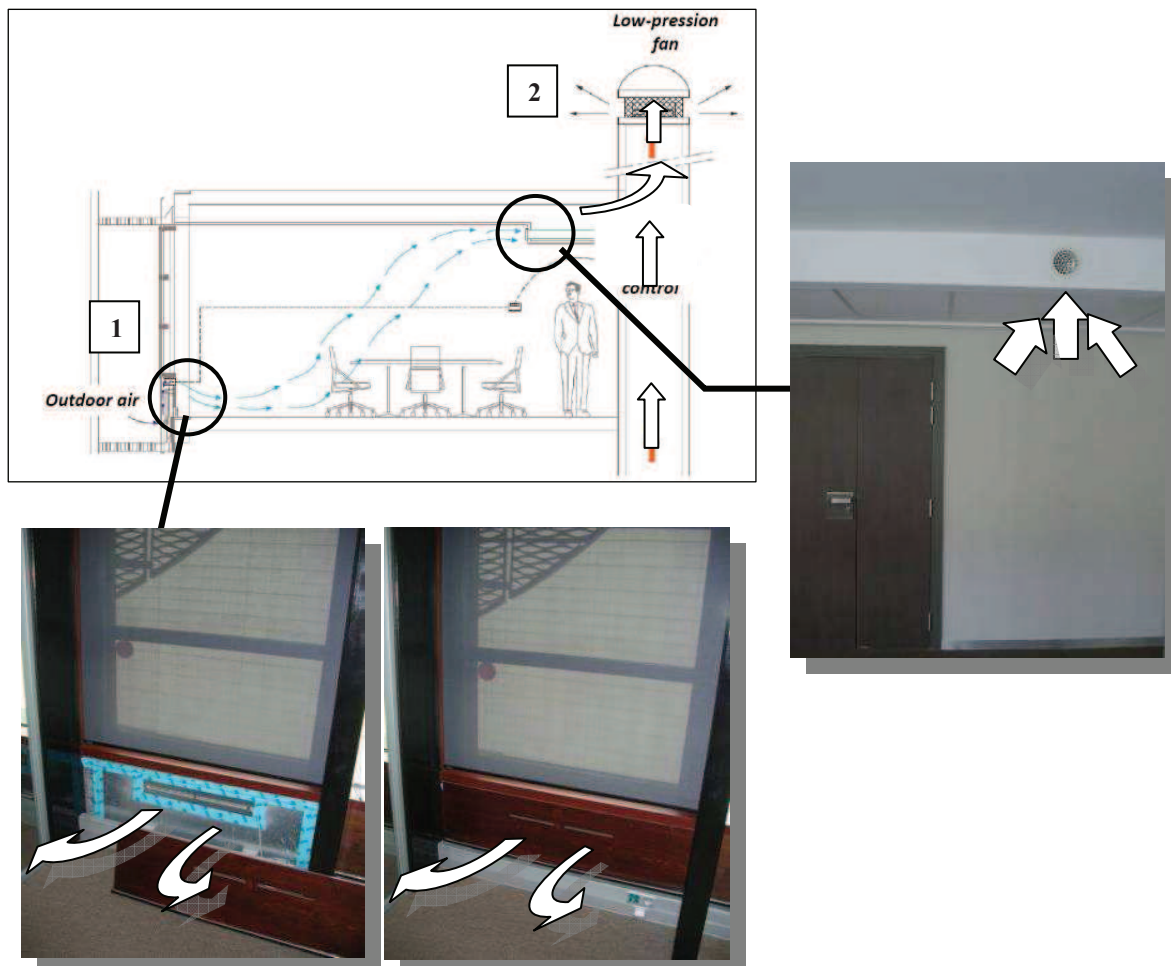


Figure 58. "Triple Flux"

1.2 Le système de chauffage

En hiver, le système de ventilation double flux permet de préchauffer l'air. Si nécessaire, un complément est fait au niveau de la CTA (R+10) via une batterie chaude. Le chauffage d'appoint est fait par le biais du vecteur air via les poutres climatiques (figure 59). L'air extérieur (1) est préchauffé par l'échangeur de chaleur double flux et la batterie chaude (2) de la CTA, il est soufflé dans chaque étage via les poutres climatiques. Le chauffage pour la batterie chaude et les poutres climatiques est fourni par deux chaudières à bois (3) qui fonctionnent en alternance, chaque chaudière à une puissance de 100 kW. Les poutres climatiques (4) sont équipées d'une batterie à eau (5), le chauffage de l'étage est fait par contact entre l'air soufflé et les batteries à eau. L'air de la CTA rentre en contact avec la batterie à eau. La température de sortie dépend du besoin pour atteindre toujours une consigne de 22°C.

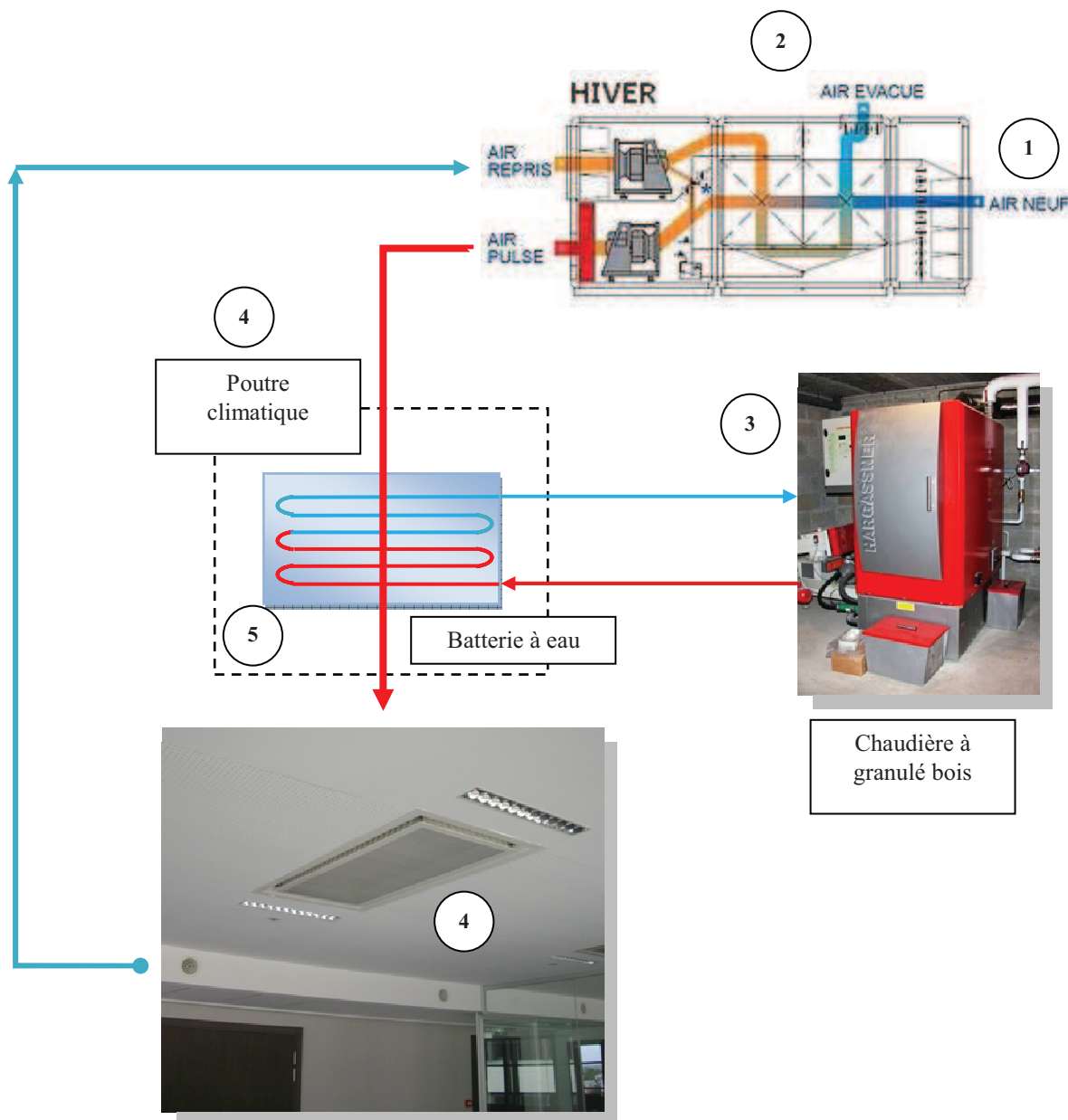


Figure 59. Fonctionnement mode hiver

1.3 Le système de rafraîchissement – Période estivale

Pendant la période estivale ou quand la température extérieure est supérieure à 24°C, le système de ventilation double flux continue à assurer la ventilation du bâtiment, l'air extérieur (1) chaud est refroidi dans la CTA de manière adiabatique (pulvérisation d'eau) (3). Cet air frais (5) est ensuite distribué à l'intérieur du bâtiment via les poutres (6). Si la température intérieure de consigne n'est pas atteinte, un groupe froid produit de l'eau glacée pour la faire passer dans la batterie à eau des poutres (7). L'air de la CTA rentre en contact avec la batterie et se refroidit, de cette façon la température à l'intérieur du bâtiment est toujours maintenue en dessous de 24°C.

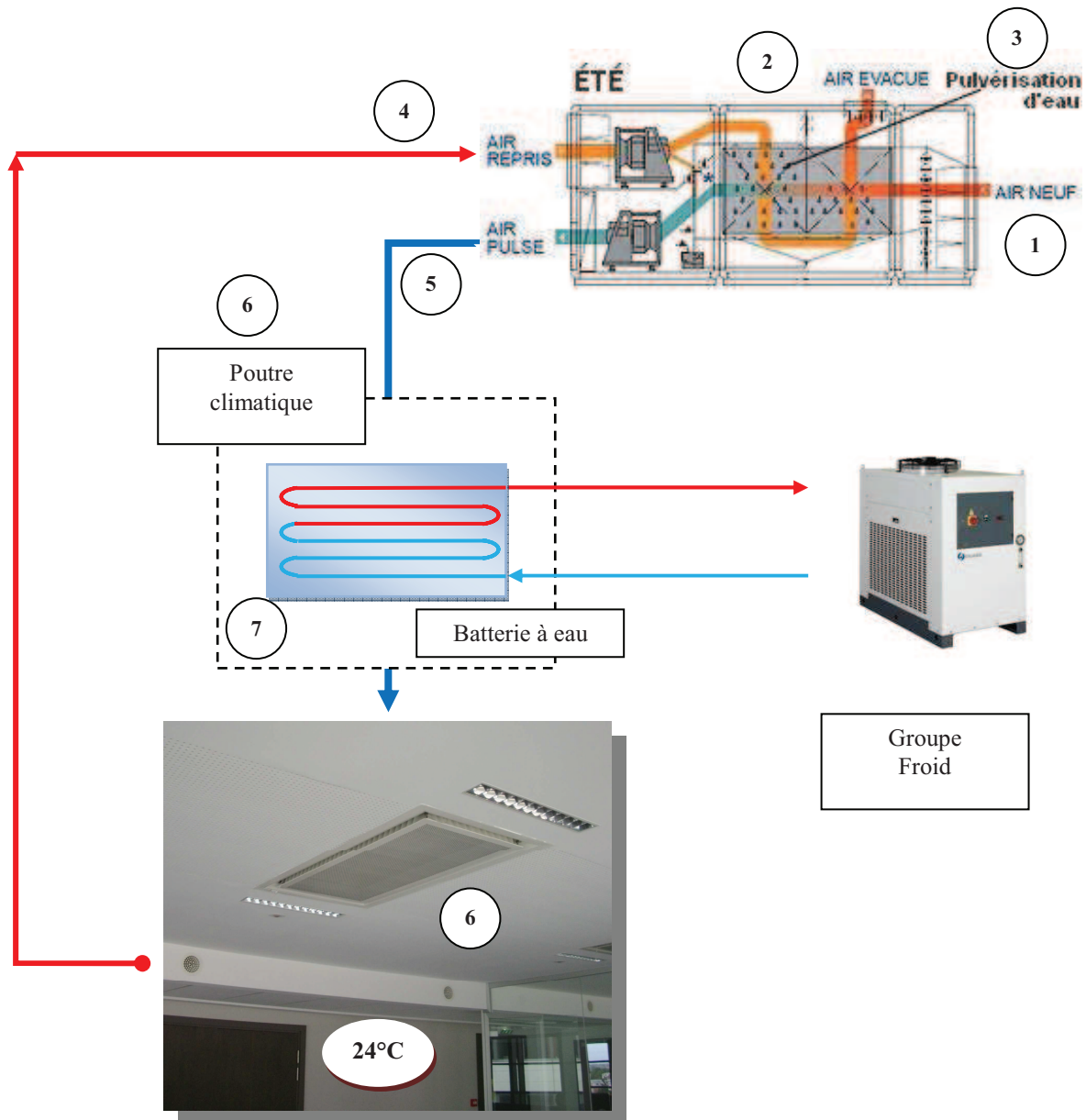


Figure 60. Fonctionnement mode estivale

Pour libérer les calories accumulées pendant la journée et réduire la nécessité d'utilisation du groupe froid ou du rafraîchissement adiabatique, une sur ventilation nocturne a été aussi prévue. La nuit, deux ventilateurs extraient du bâtiment un volume d'air d'environ 30 000 m³/h. Ce volume d'air est amené via les entrées d'air en façade. Pour les mi-saisons, où quand les températures extérieures sont comprises entre 15°C et 25°C le système de ventilation triple flux assure la ventilation et le rafraîchissement du bâtiment. L'air extérieur suffit à maintenir le bâtiment confortable. Le schéma de principe du fonctionnement de la ventilation est présenté figure 61. Les poutres climatiques sont utilisées seulement si la température intérieure est inférieure à 24°C. Le triple flux est utilisé si deux conditions sont remplies, d'une part si la température intérieure se trouve entre 21 et 24°C, ou supérieure à 22°C en hiver, et d'autre part si l'humidité extérieure est plus basse que l'humidité intérieure, cela pour éviter une possible condensation dans les poutres.

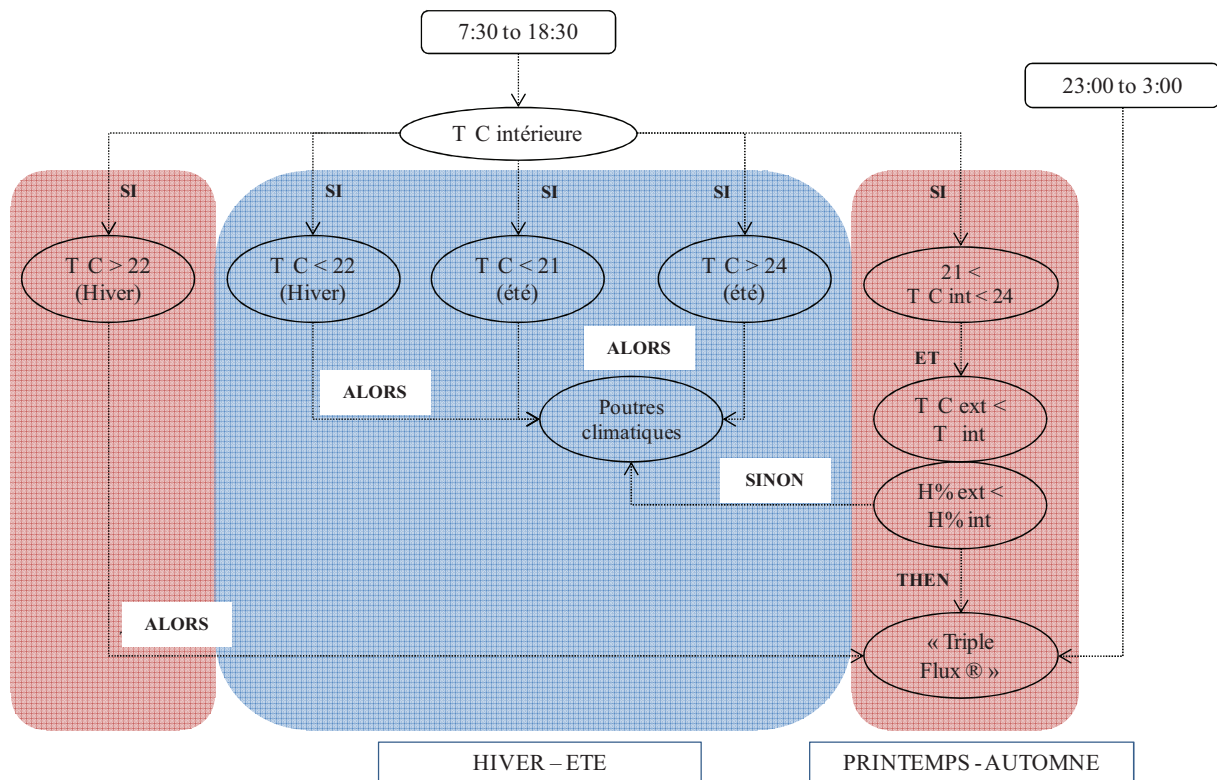


Figure 61. Schéma de principe - Ventilation

1.4 Le système d'éclairage

L'éclairage de la Tour Elithis a été conçu pour être couvert en majorité par la lumière naturelle, figure 62.



Figure 62. Éclairage naturelle - Tour Elithis

Une surface vitrée de 75% des façades permet de couvrir les besoins de base. Dès qu'il est nécessaire, un éclairage d'appoint de type plafonnier est disponible (figure 63). Il fonctionne de manière passive c'est-à-dire, aucune action de la part de l'utilisateur n'est nécessaire pour l'allumer ou l'éteindre. Une détection de présence permet de contrôler l'éclairage. Dans un premier temps, la détection mesure l'occupation de la zone ensuite un capteur mesure l'intensité lumineuse, si l'éclairement est inférieur à 200 lux au niveau du plafond, environ 300 lux au niveau du bureau, l'éclairage est déclenché. La puissance totale installée est de 2 W/m². Deux luminaires par poutre ont été installés pour faire un total de 64 luminaires répartis à chaque étage. Chaque luminaire est composé d'un tube fluo compact T5 d'une puissance totale de 14W.

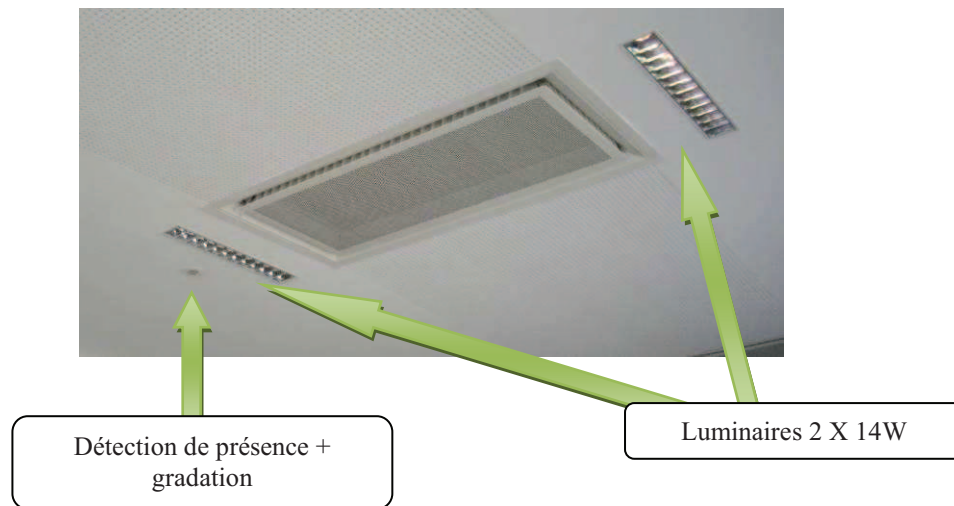


Figure 63. Eclairage artificielle

1.5 Le bouclier thermique

Une des plus grandes innovations est le bouclier thermique du bâtiment. Ce système permet de mieux gérer les apports solaires. Le bouclier thermique de la Tour Elithis permet de :

Limiter les apports solaires en été

Maximiser les apports solaires en hiver

Profiter d'une lumière naturelle tout au long de l'année

Donner aux occupants une vue sur l'extérieur qui favorise le confort visuel

La forme du bouclier a été particulièrement étudiée. La courbe de course du soleil a été tracée sur toute la façade du bâtiment pour définir la forme du bouclier. Le bâtiment est protégé par les bâtiments adjacents (Auditorium et Palais de Congrès). Dans la figure 64, on observe la différence de hauteur des bâtiments voisins. Du côté ouest (bâtiment à gauche) le bâtiment mesure 27m de hauteur et celui situé à l'est (bâtiment à droite) mesure 14m. Cette différence fait que le bouclier n'a pas la même forme. Dans la figure 65 nous observons la forme finale du bouclier.

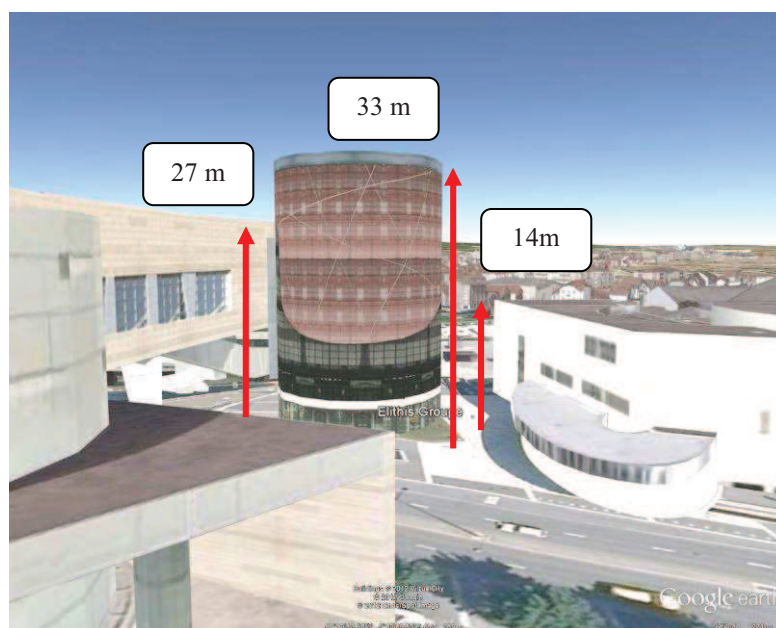


Figure 64. Tour Elithis - Vu en face - Google Earth



Figure 65. Vue Est - Ouest Tour Elithis - COMAIR

Le bouclier solaire a été conçu spécifiquement pour ce bâtiment par Métal Déployé. On peut considérer cet élément comme des lamelles de stores avec une orientation de 56° . En plus de la régulation des apports solaires, elles préservent la visibilité vers l'extérieur et apportent de l'éclairage naturel (figure 66).

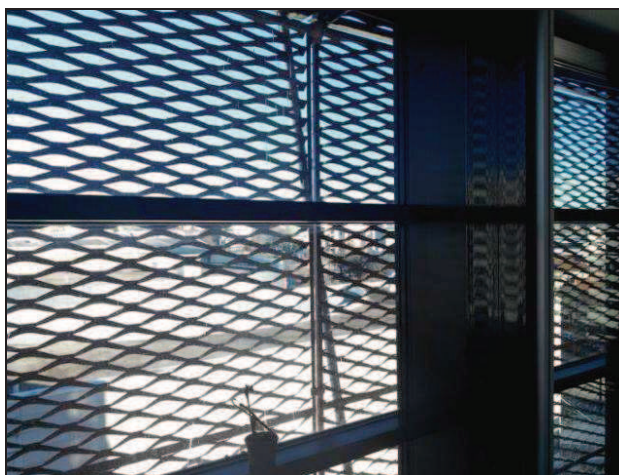


Figure 66. Vu intérieur du bouclier

Par contre, le fait d'être fixe, cause un problème d'éblouissement, à l'est et à l'ouest, notamment en mi-saison. Ces problèmes se sont aggravés avec la distribution ouverte des bureaux. Pour y remédier, des stores intérieurs ont été installés sur certains vitrages.

1.6 La production photovoltaïque



Figure 67. Toiture Tour Elithis

La toiture est recouverte de 560m^2 de panneaux photovoltaïques (figure 67), reliés à 24 onduleurs, qui assurent une production électrique annuelle de 82000 kWh. La surface photovoltaïque aurait pu être plus importante mais les souhaits des concepteurs n'étaient pas le « zéro énergie », ils cherchaient à optimiser l'efficacité énergétique à un coût standard en faisant participer l'utilisateur. L'efficacité énergétique ne peut pas être atteinte s'il n'existe pas une implication des utilisateurs du bâtiment.

2. BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA TOUR ELITHIS

Nous avons présenté la Tour Elithis et une description a été faite de ses systèmes techniques de manière succincte. Maintenant, nous allons présenter le bilan énergétique des trois premières années de la Tour Elithis. Pendant la conception du bâtiment, les ingénieurs d'Elithis avaient fait plusieurs estimations afin de déterminer quelle serait la consommation réelle du bâtiment.

2.1 Bilan des usages réglementaires en énergie primaire

La figure 68, présente le bilan du bâtiment, en phase conception, et durant les trois premières années, pour les 5 usages réglementaires (chauffage, rafraîchissement, ventilation, éclairage et auxiliaires) :



Figure 68. Bilan énergétique Tour Elithis

En phase conception, les estimations avaient donné comme résultat un bâtiment avec un bilan à énergie positive. La production devait compenser largement la consommation du bâtiment. La première année a affiché un résultat intéressant, bien qu'il ait présenté des différences avec la prédiction. En revanche, sur les deuxième et troisième années, des écarts plus importants ont été observés.

2.2 Bilan totale en énergie primaire

La figure 69, montre le bilan pour la consommation totale du bâtiment. Nous pouvons observer clairement que la prise en compte de la consommation des ascenseurs et des équipements bureautiques impactent considérablement le bilan.

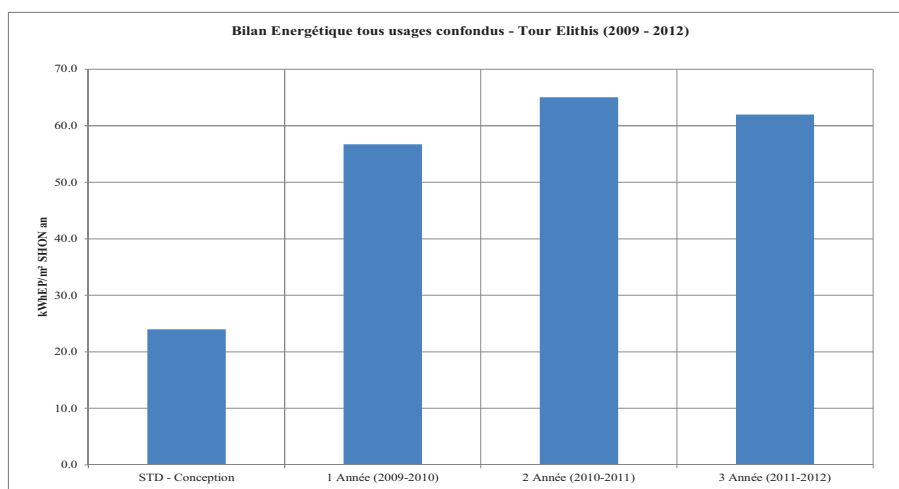


Figure 69. Bilan énergétique tous usages – Tour Elithis

En phase conception, une différence d'environ 20 kWhEP/m² an avait été estimée, d'après les concepteurs cet écart serait compensé par un suivi du comportement des usagers et par des bons gestes, arrêt total des PC avec l'utilisation des prises de courants, utilisation des escaliers, entre autres. Ce qui est intéressant dans ce bilan, c'est que pour les trois premières années la consommation a été constante, peu de différences sont observées.

2.3 Discussion de résultats

Nous avons observé des disparités dans les consommations notamment dans le bilan de la figure 68. La figure 70 présente un détail poste par poste de la consommation du bâtiment :

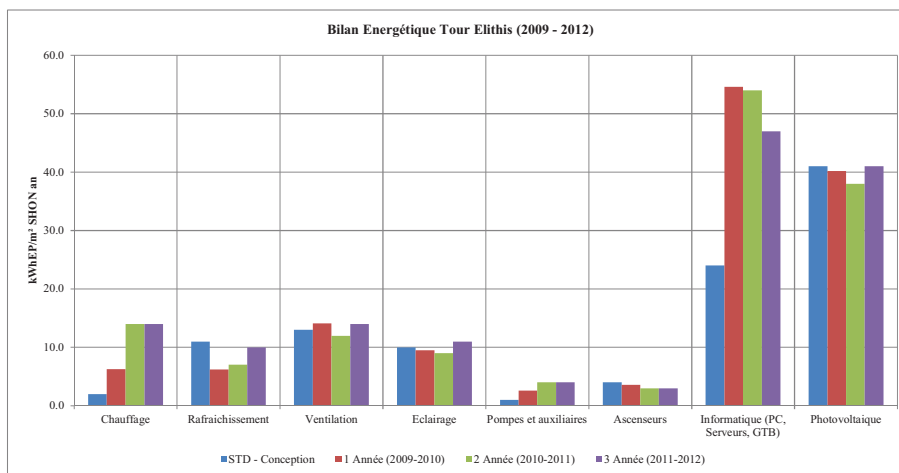


Figure 70. Bilan énergétique Tour Elithis (Usages réglementaires)

De manière générale, les estimations faites par les ingénieurs d'Elithis ont permis de prédire la consommation réelle du bâtiment. En revanche, pour la partie chauffage le constat est bien différent. La consommation de chauffage montre une évolution quasi linéaire année par année. La première année la température de chauffage a été fixée à 19°C, température réglementaire. Une différence entre la simulation et la réalité avait été observée. Des dysfonctionnements au niveau de la régulation et du système de gestion centralisée (GTC) avaient été constatés, ce qui explique les différences. Les hypothèses et le moteur de calcul peuvent aussi expliquer les écarts (Spitz, 2012), le chauffage ainsi que le rafraichissement présentent des différences. En revanche, l'estimation de la consommation bureautique présente une grande disparité et ne permet pas d'expliquer les écarts observés. Ce poste, apporte une grande quantité de calories, qui vont impacter la demande de chaud et de froid.. Cette forte émission thermique devrait permettre de compenser la demande en chaud alors que celle-ci a augmenté. Pour le froid, elle devrait conduire à augmenter la demande qui est de fait plus importante. Dans les années suivantes, la consigne pour le chauffage a été fixée à 22°C et pour le rafraichissement à 24°C, ce qui explique une augmentation de la consommation. Le confort des occupants a été privilégié ce qui impact directement la consommation du bâtiment.

2.4 Bilan du bâtiment en énergie finale

Nous avons présenté le bilan du bâtiment qui, malgré des disparités observées, permet de le classer comme un bâtiment performant du point de vue énergétique. Dans la figure 71, nous présentons ce même bilan mais en termes d'énergie finale, car cet ordre de grandeur définit le besoin réel du bâtiment. La conversion entre l'énergie finale et l'énergie primaire est obtenu par des coefficients qui dépendent du type d'énergie (Bois : 0,6, Électricité 2,58). Pour le rafraichissement l'EER (Energy Efficiency Ratio) moyen des machines est de 8)

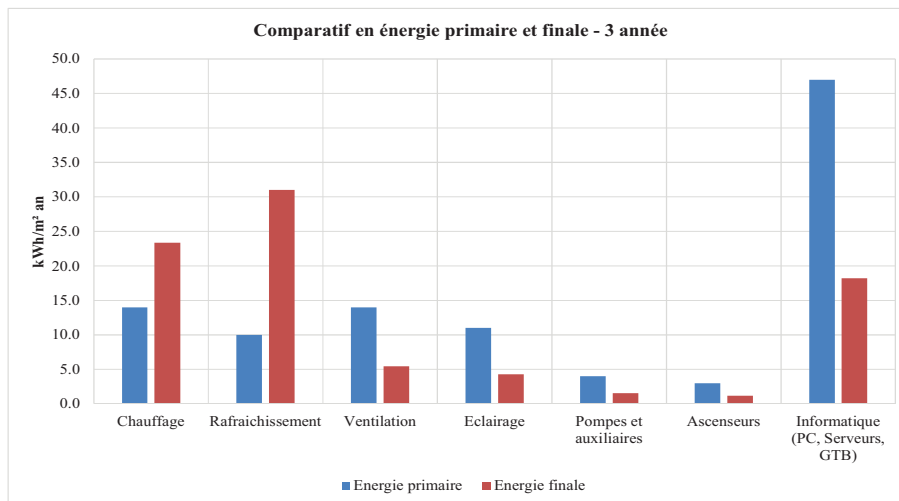


Figure 71. Bilan en énergie primaire et en énergie finale

En termes d'énergie finale, nous constatons que le poste rafraîchissement est le poste de consommation le plus important pour le bâtiment. Le chauffage se place en deuxième et l'informatique en troisième. Le groupe froid utilisé pour le rafraîchissement du bâtiment a un coefficient de performance EER de 8, qui permet de réduire considérablement la consommation du bâtiment. Nous pouvons constater que le besoin réel du bâtiment, même s'il reste faible, montre que le rafraîchissement et le chauffage restent les plus énergivores.

L'objectif principal du projet n'est atteint que la première année et seulement, en prenant en compte, les usages réglementaires. Même pendant la phase de conception, la consommation totale estimée est au-dessus du « zéro énergie ». De la même manière que dans les études présentées dans le chapitre II, pour assurer un bon confort il est nécessaire parfois d'augmenter la consommation. Malgré cela, la Tour Elithis se place comme un bâtiment très performant du point de vue énergétique.

Nous avons réalisé un suivi de la consommation du bâtiment pendant 3 années. Nous avons vu que le confort avait été privilégié ce qui a impacté la consommation. En revanche, aucune enquête n'avait été réalisée, seul l'avis des usagers avait été utilisé pour modifier les consignes de températures. De la même manière, aucun suivi n'a été réalisé en ce qui concerne la qualité de l'air intérieur, c'est pour cela que nous avons mis en place un suivi au niveau du confort de la qualité de l'air, que nous proposons de présenter ci-après.

3. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE RESSENTI

Le confort thermique est défini, de manière simple, comme l'absence d'une sensation de chaud et/ou de froid (Candas, 1998) (Thellier, 1989). Des différences de températures provoquées par une climatisation mal régulée, en particulier dans les bureaux à grande surface vitrée, peuvent créer des phénomènes d'inconfort. Une mauvaise prise en compte de ces phénomènes peut se développer dans une diminution de la productivité (Wittczak T, 2001). Nous nous intéressons donc au confort ressenti par les occupants, de manière générale dans la Tour Elithis ce critère a été utilisé pour modifier la température de consignes mais aucun suivi n'a été réalisé. Nous avons effectué, suite à cette réflexion, un suivi du confort thermique dans la Tour Elithis pendant environ un an (2010 – 2011). Cette étude nous a permis de mieux comprendre le confort thermique dans le bâtiment.

3.1 Période hivernale

La meilleure manière d'analyser le confort thermique dans un bâtiment est d'interroger les utilisateurs (Fanger, 1973). Nous avons évalué non seulement le confort thermique mais aussi les inconforts et le ressenti global des usagers.

Faire un suivi avec des enquêtes sur papier n'était pas viable du point de vue environnementale, et du traitement des réponses. L'objectif était d'obtenir un maximum de réponses et sur toute la population. Pour cela, nous avons créé notre propre enquête (voir annexe 1), en nous basant sur les normes ISO 7730, 10551 et ASHRAE 55-2010. Celle-ci a été numérisée et placée dans un serveur externe, qui nous a permis de garantir l'anonymat des réponses. Un mail permettait d'avertir l'utilisateur de la mise à disposition de l'enquête. La personne n'avait plus qu'à cliquer sur un lien et suivre les instructions. Les résultats étaient donc stockés de manière automatique. Nous avons ainsi envoyé un mail toutes les semaines, les usagers pouvaient accéder à l'enquête en fonction de leur disponibilité. Un mail de rappel était envoyé au milieu de chaque semaine (les mercredis) pour rappeler le questionnaire. Le questionnaire a été divisé en 5 parties, les thèmes abordés sont présentés dans le tableau 18 :

Tableau 18. Sujets abordés dans le questionnaire

I PARTIE. Information (Fanger)	Sexe Age Étage Emplacement géographique et par rapport aux fenêtres Tenue vestimentaire Activité
II PARTIE. Confort Hygrothermique	Perception et satisfaction quant à la température Perception et satisfaction quant à l'humidité Les courants d'air
III PARTIE. Qualité de l'air	Odeurs Irritations Perception de la QAI
IV PARTIE. Qualité de l'environnement intérieur	Éclairage Bruit Perception générale de l'ambiance

Au total 22 questions ont été posées, réparties en fonction du thème. Pour la première partie, au total 6 questions ont été posées, celles-ci nous ont fourni des informations importantes quant au type de population et sur les habitudes vestimentaires. Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés au confort hygrothermique et à l'inconfort lié aux courants d'air, 7 questions ont été posées dans cette partie. Le détail de questions est le suivant :

Tableau 19. Détail de question – Température/Humidité

Critère	QUESTION	ECHELLE
Température	Comment percevez-vous la température ambiante à ce moment précis?	Extrêmement chaud Très chaud Chaud Légèrement chaud Ni chaud ni froid Légèrement froid Froid Très froid Extrêmement froid
	Trouvez-vous cela?	Confortable Légèrement inconfortable Inconfortable Très inconfortable Extrêmement inconfortable
Humidité	Comment ressentez-vous l'humidité ambiante ?	Trop humide Légèrement humide Neutre Légèrement sèche Très sèche
	Trouvez-vous cela?	Confortable Légèrement inconfortable Inconfortable Très inconfortable Extrêmement inconfortable
Courants d'air	Ressentez-vous un courant d'air....	Froid / Chaud, d'où provient-t-il ?

Dans la troisième partie, au total 5 questions ont été posées. Ici nous nous sommes intéressés aux odeurs (perception de la qualité de l'air) et aux possibles phénomènes liées à une mauvaise qualité de l'air (fatigue, irritation oculaire, de la peau, etc.), le détail est le suivant :

Tableau 20. Détail de question - QAI

Critère	QUESTION	ECHELLE
QAI	Ressentez-vous des odeurs inhabituelles?	Oui / Non
	Comment caractérisez-vous les odeurs que vous percevez ?	Aucune odeur Odeur corporelle Neuf renfermé Parfum Produit de nettoyage Nourriture Plastique Fumée de cigarette Autre (veuillez préciser)
	Ressentez-vous une irritation des yeux, gorge ou du nez?	Oui / Non

	Ressentez-vous une sensation de fatigue?	Beaucoup Un peu Rien du tout
	En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?	Extrêmement bonne Très bonne Bonne Légèrement Mauvaise Mauvaise Très mauvaise Extrêmement Mauvaise

Dans la dernière partie, nous nous sommes intéressés au confort visuel et acoustique et d'une manière générale à la qualité globale de l'ambiance. Au total 4 questions, le détail est présenté dans le tableau 18 :

Tableau 21. Détail de question - QE1

Critère	QUESTION	ECHELLE
QE1	Comment évaluez-vous le niveau d'éclairage actuellement?	Extrêmement élevé Très élevé Élevé Légèrement élevé Acceptable Légèrement faible Très faible Extrêmement faible
	Vous sentez-vous ébloui par la lumière actuellement?	Beaucoup Un peu Rien du tout
	Percevez-vous un ou des bruits gênants? (Facultatif)	Voix Serveur Trafic Téléphone Imprimante Photocopieur Conversation téléphonique
	En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?	Extrêmement confortable Très confortable Légèrement confortable Confortable Inconfortable Légèrement inconfortable Très inconfortable Extrêmement inconfortable

3.1.1 Bilan période hivernale

Le bâtiment a été conçu pour une occupation maximale de 300 personnes. Quand nous avons réalisé ce suivi environ 230 personnes occupaient le bâtiment. Dans cette première partie, nous avons récolté 286 réponses mais seulement 274 ont terminé la totalité du questionnaire. Le taux de participation réelle a été estimé à 78% (188 personnes) en tenant compte du fait qu'une seule personne peut répondre plusieurs fois au questionnaire. Nous présentons les résultats de la première partie (voir tableau 18) :

- **Le sexe**

Les résultats sont présentés dans la figure 72 :

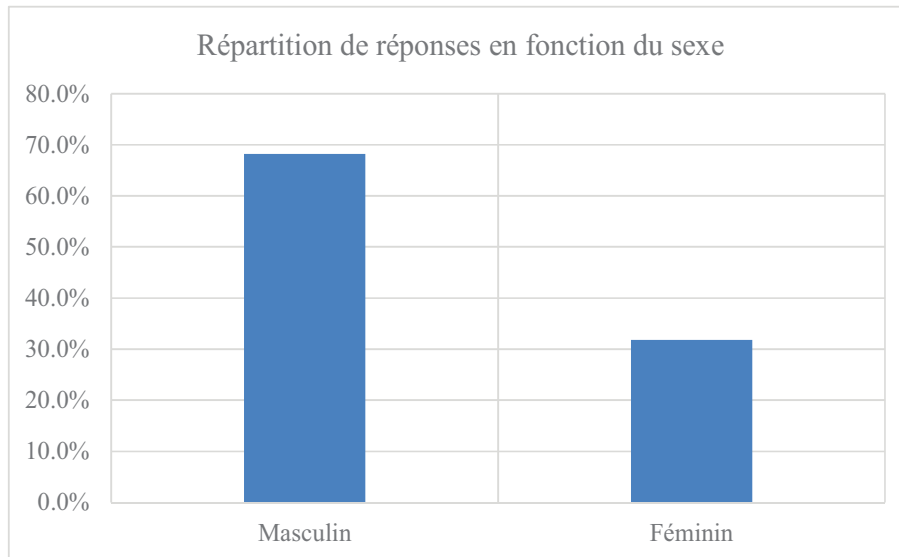


Figure 72. Répartition des réponses en fonction du sexe

Nous pouvons observer que la population est composée majoritairement par des hommes. Le taux de satisfaction peut se voir influencé par ce résultat. Black (Black, et al., 1996) dans ses travaux sur le métabolisme avait conclu qu'entre un homme et une femme, la sensation de confort peut varier d'environ 20%. Les femmes ont un métabolisme moins important que celui des hommes ce qui explique que leur perception de la chaleur soit différente.

- **Age**

La figure 73 montre le taux de participation en fonction de l'âge :

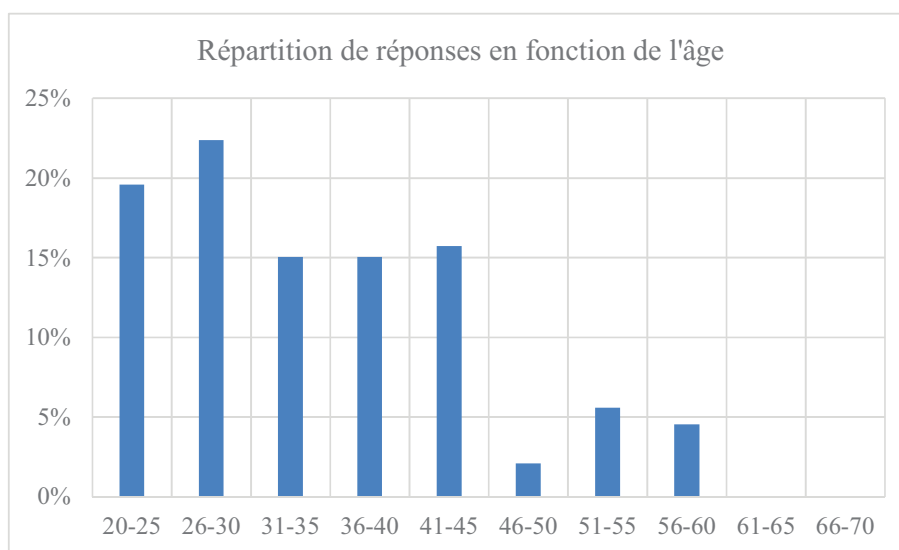


Figure 73. Répartition des réponses en fonction de l'âge

Nous observons une population plutôt « jeune ». En effet, plus de la moitié des répondants ont moins de 35 ans. Par rapport au confort, il a été observé que le métabolisme diminue de 2 % à 3 % par décennie après l'âge adulte (Black, et al., 1996). Dans notre cas, le fait d'avoir une population plutôt « jeune » peut favoriser la satisfaction vis-à-vis du confort d'hiver car le métabolisme est plus important. En revanche, s'agissant du confort d'été, celui-ci peut-être moins bon.

- **Étage**

Les résultats sont présentés dans la figure 74 :

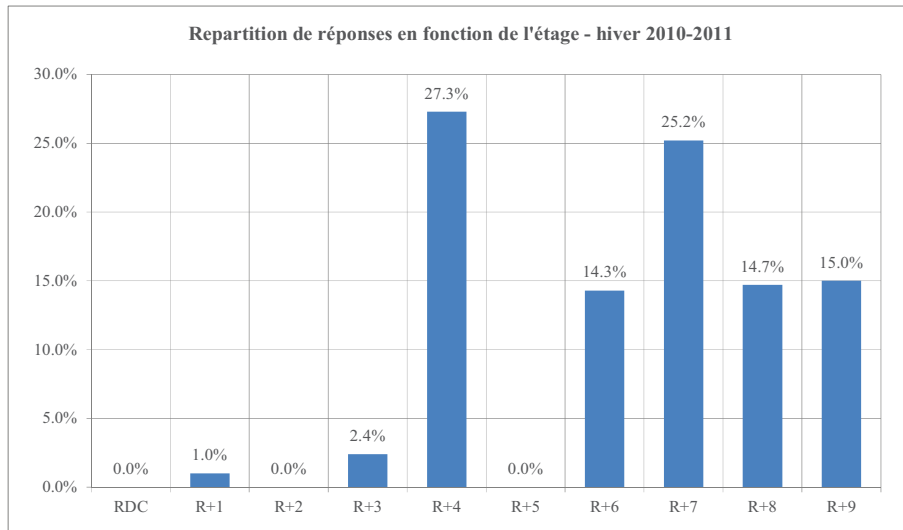


Figure 74. Répartition des réponses de fonction de l'étage - Hiver 2010-2011

A cette période, les étages 2 et 5 étaient inoccupés d'où le pourcentage. Nous pouvons observer le bon taux de participation dans les étages 4, 6, 7, 8 et 9. Les étages 4 et 7 présentent le taux de participation le plus élevé. De manière générale, nous avons récolté des réponses sur 5 étages, le retour est intéressant considérant la taille du bâtiment.

- **Orientation**

La figure 75 présente les résultats :

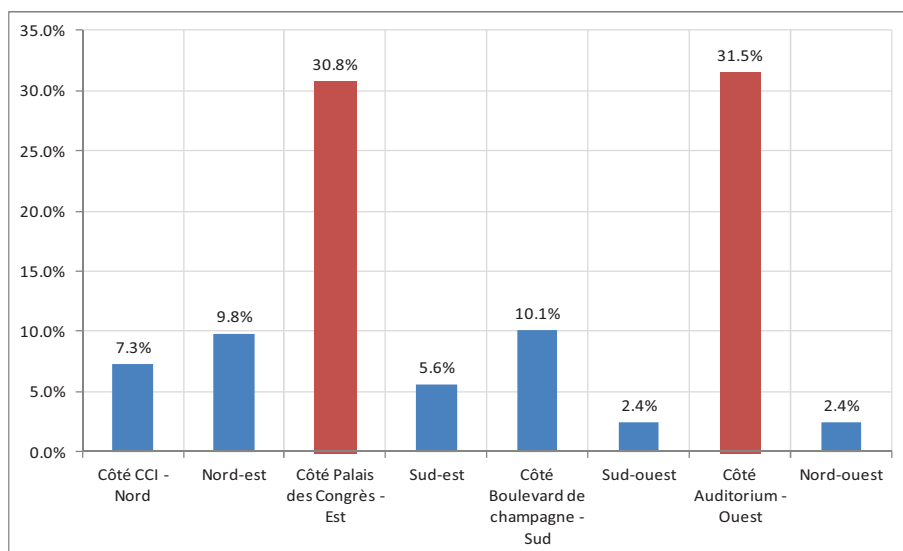


Figure 75. Répartition des réponses en fonction de l'orientation

Au niveau de la répartition vis-à-vis de l'orientation, nous observons un nombre plus important de réponses coté est et ouest du bâtiment. La forme du bâtiment ovale, fait qu'un nombre plus important d'utilisateur est concentré à l'est et à ouest du bâtiment. Si nous prenons l'orientation vis-à-vis des fenêtres (figure 76), nous observons un nombre plus important de réponses où les fenêtres sont situées derrière la personne interrogée. Cela peut augmenter l'inconfort lié aux parois froides.

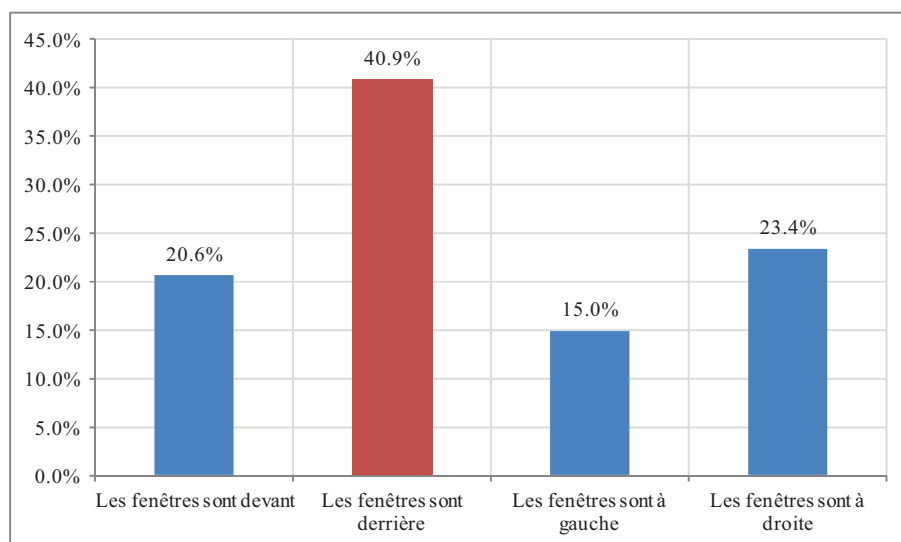


Figure 76. Répartition des réponses en fonction de la position des fenêtres

- **La tenue vestimentaire**

Pour cette partie, nous avons calculé une résistance totale pour chaque personne liée à sa tenue vestimentaire. Nous avons déterminé les valeurs auxquelles les réponses se trouvaient en dessous d'une valeur de 0.9 clo (Valeur moyenne pour une tenue moyenne hiver (De Dear, et al., 1998)). La figure 77 montre la répartition des réponses, tenant compte de la valeur moyenne :

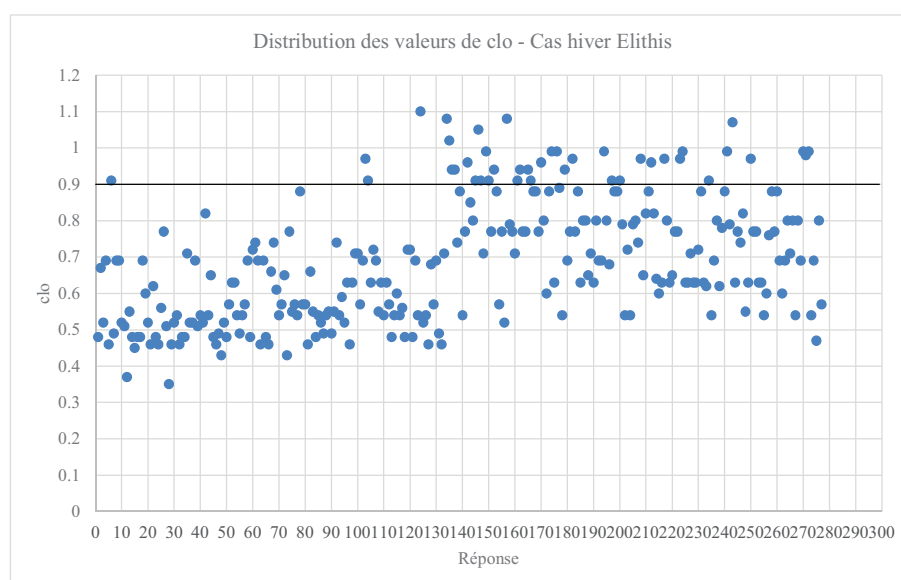


Figure 77. Répartition de valeurs de « clo »

De manière générale, nous pouvons observer que les personnes sont « insuffisamment » habillées, un nombre important de valeurs d'isolation de la vêtue inférieure à 0.9 clo a été observé. Avec ces résultats nous avons déterminé une valeur moyenne d'isolation de la vêtue de 0.69 clo.

- **Activité**

La figure 78 présente la répartition des réponses recueillies en fonction de l'activité. La plupart du temps les usagers ont été assis pour répondre à cette enquête, activité en lien direct avec un travail de bureau.

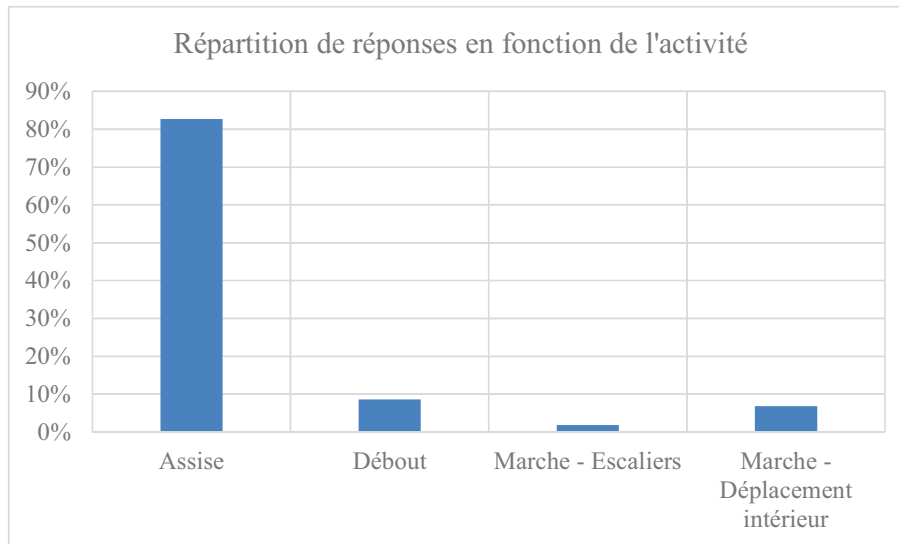


Figure 78. Répartition de réponses en fonction de l'activité

Nous avons observé les résultats des enquêtes au regard des informations de base. Nous avons pu voir que la population du bâtiment est plutôt composée d'hommes et que la moyenne d'âge est autour de 35 ans. Au niveau de l'orientation les usagers sont concentrés sur les cotés est et ouest du bâtiment du fait de sa forme. Nous avons observé aussi qu'au niveau de la tenue vestimentaire, elle ne serait pas correctement adaptée. Quant à l'activité, logiquement, les usagers sont souvent assis, ce qui diminue considérablement le métabolisme.

3.1.1 Bilan confort thermique

La figure 79 présente les résultats obtenus quant au ressenti thermique :

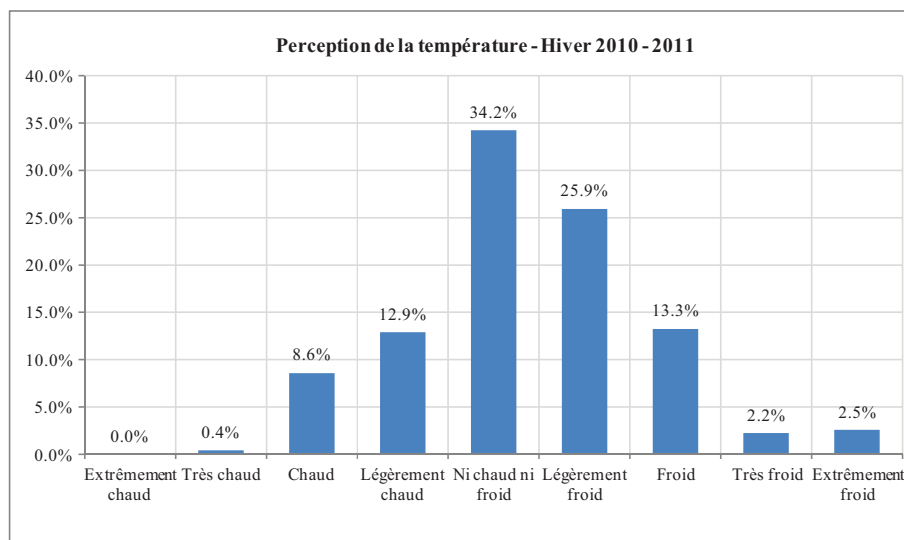


Figure 79. Perception de la température - Hiver 2010-2011

Seulement 34% de réponses présentent une perception neutre au niveau de la température. En prenant les réponses « légèrement chaud et froid » le taux de satisfaction serait d'environ 72% mais cela reste hypothétique car le ressenti thermique n'est pas synonyme de satisfaction. Nous observons par contre, une insatisfaction qui augmente avec un ressenti « froid ». La figure 80 montre le taux de satisfaction au regard des températures :

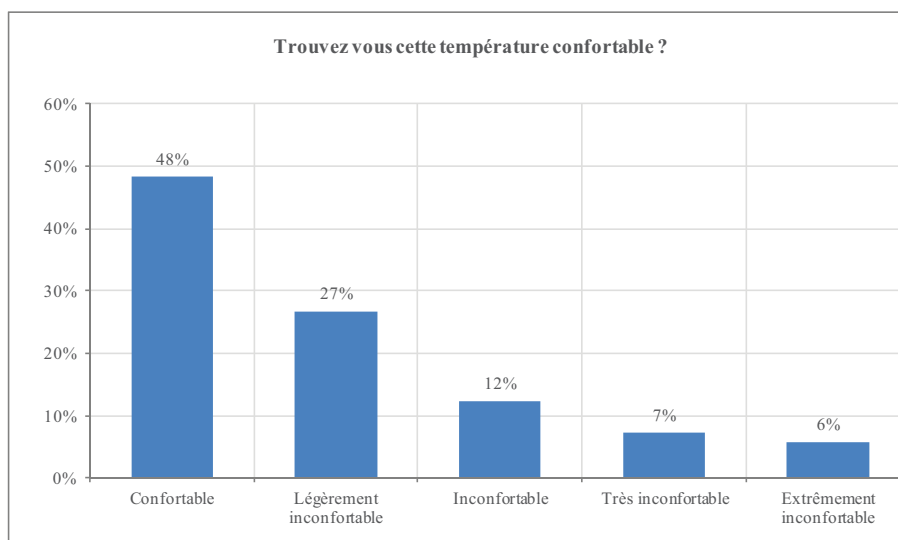


Figure 80. Taux de satisfaction - Hiver 2010-2011

Le niveau de satisfaction est plus intéressant mais il reste faible : 48% des utilisateurs ont déclaré un confort satisfaisant quant à la température intérieure. Finalement, le taux d'insatisfaction paraît très élevé. Si nous comparons le ressenti (figure 79) et la satisfaction (figure 80), nous pouvons observer que le taux de satisfaction est plus important que la perception d'une température neutre.

- **Bilan des courants d'air parasites (courant d'air / infiltrations)**

Vis-à-vis des courants d'air, nous avons pu observer une distribution assez partagée avec un taux de réponse plus élevé constatant des courants d'air provenant du haut. Le chauffage est assuré par l'air. A certains moments de la journée, quand le système de chauffage s'arrête car la consigne est atteinte, les usagers déclarent toujours une sensation de courant d'air froid. Le système de ventilation continue à fonctionner, la température de soufflage diminue et donc, le ressenti de courant d'air provenant du haut est plus important. La figure 81 montre la répartition des réponses :

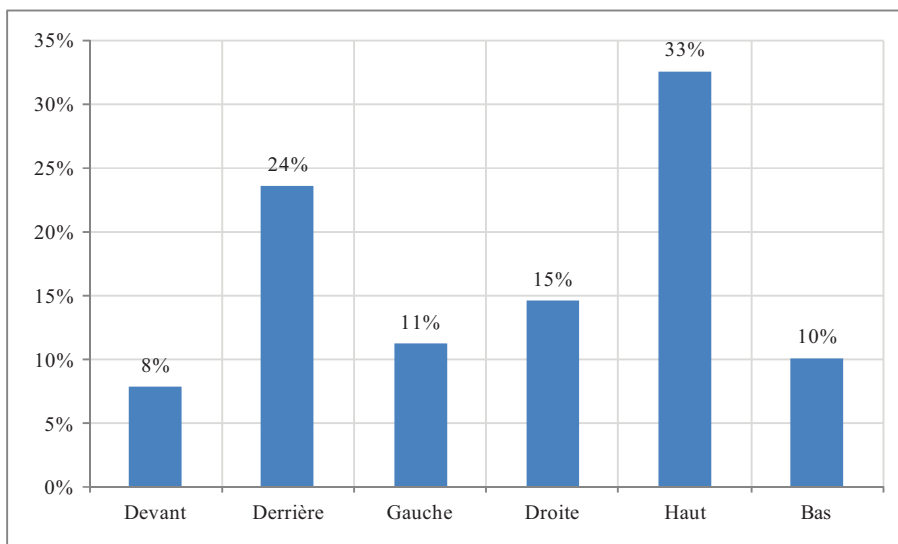


Figure 81. Perception des courants d'air parasites dans le bâtiment

33% des personnes ont déclaré un inconfort lié à la sensation de courant d'air provenant du haut. Le système de ventilation et sa répartition expliquent ce phénomène, dans l'image suivante, on peut observer comment l'air est répartie dans un bureau. Nous avons observé un inconfort lié aux courants d'air en provenance du haut et de derrière. Déterminer le comportement de l'air est très compliqué, seuls les tests avec des gaz traceurs (SF6) ou des simulations CFD peuvent permettre de réaliser ce travail. Nous avons donc opté pour la dernière solution.

A partir de ce constat, nous avons fait quelques simulations« CFD » avec OpenFoam® pour pouvoir observer la distribution d'air dans l'espace. Ce travail a été réalisé en partenariat avec une société spécialisée dans ces simulations (Aero Concept Engineering – ACE) et financé par l'ADEME (figure 82 et 83).

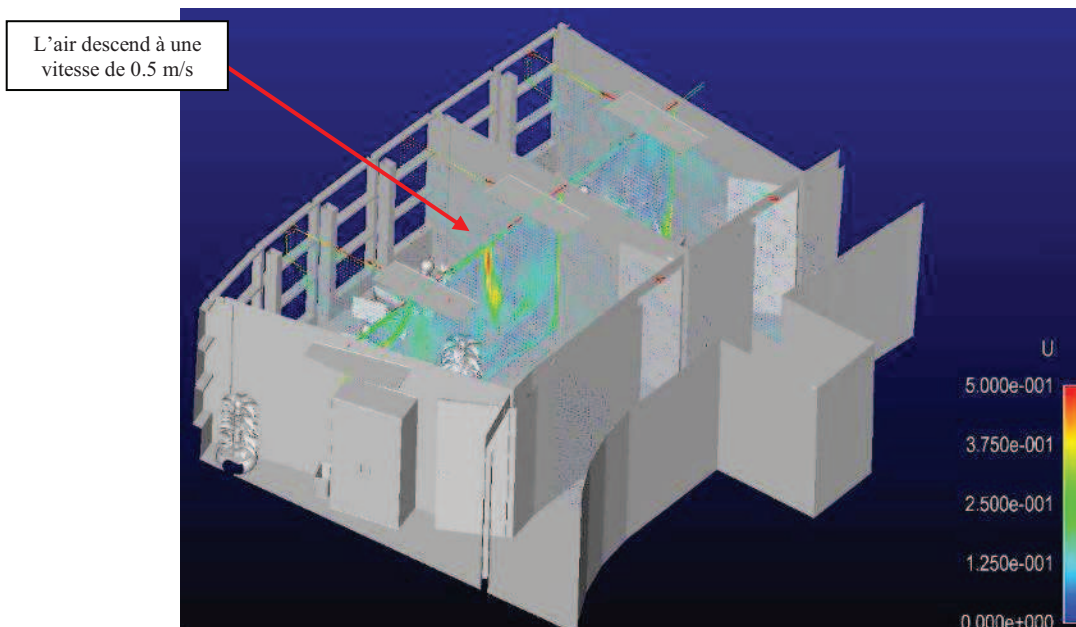


Figure 82. Distribution des vitesses d'air dans les bureaux – ACE

Quand l'air qui sort d'une poutre se croise avec l'air d'une autre, il prend de la vitesse et descend plus rapidement (0.5 m/s), les usagers qui se trouvent en-dessous vont percevoir une sensation de courant d'air. Avec l'augmentation de la température ce phénomène peut se développer encore plus. Dans l'image ci-dessus, nous pouvons observer la répartition de la température, l'air chaud des poutres se trouvent mal réparti dans la pièce, la paroi froide ne peut pas être traitée correctement. Des zones rouges sont observées près de la sortie des poutres. Le cloisonnement de l'étage ne favorise pas le confort thermique.

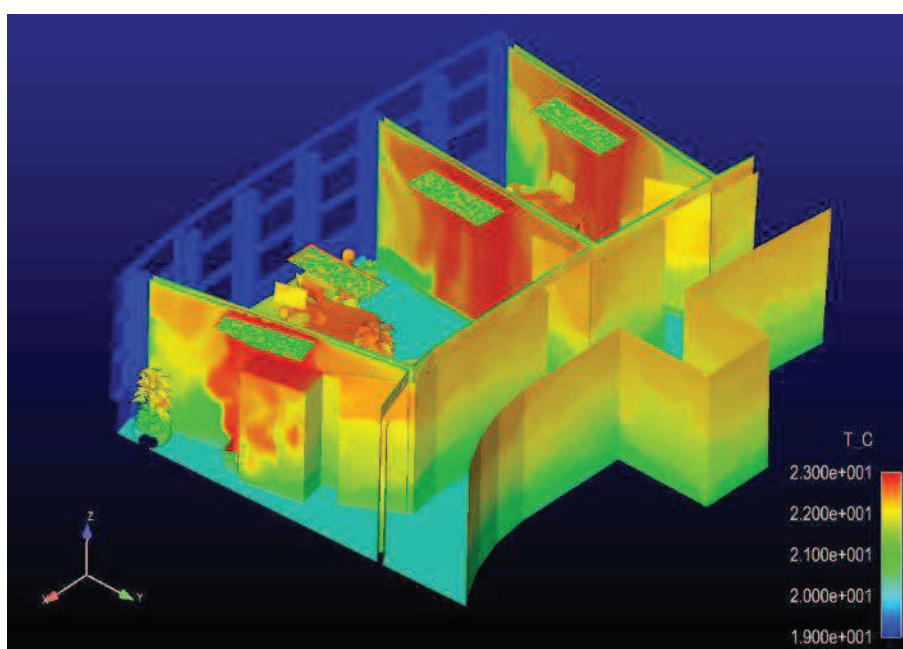


Figure 83. Distribution des températures dans les bureaux - ACE

Au niveau du confort thermique, nous avons observé que le taux de satisfaction n'est pas très bon. Nous avons vu que des inconforts liés aux courant d'air sont aussi présents et peuvent être expliqués par le positionnement proche des poutres. Le taux de satisfaction thermique varie en fonction de différentes paramètres (activité, tenue vestimentaire, sexe, âge). Au niveau de la tenue vestimentaire nous avons vu que les usagers sont insuffisamment habillés, cela a pu influencer le niveau de satisfaction. De la même manière, le positionnement vis-à-vis des fenêtres a pu jouer, à cause des parois froides.

3.1.2 Rôle de l'humidité

Les résultats sont présentés dans la figure 84 :

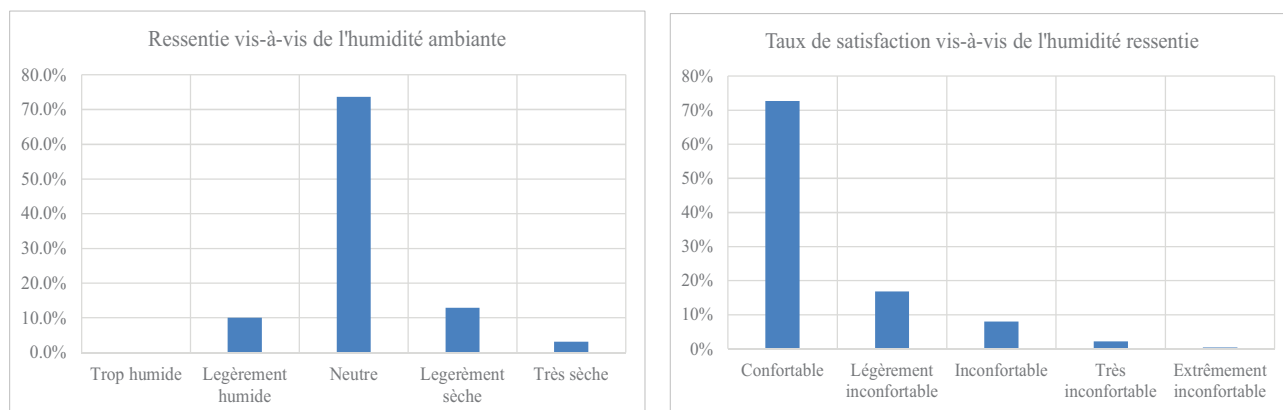


Figure 84. Perception de l'humidité dans l'air ambiant du bâtiment

Les résultats montrent clairement que l'humidité ne permet pas d'évaluer le confort. Une relation entre température et humidité existe, dans le chapitre II nous avons présenté cette relation, mais en tant que critère de confort, il est compliqué de l'évaluer. Nous pouvons simplement observer que les usagers sont satisfaits quant à l'humidité. Le corps humain ne possède pas d'organe qui permette de l'évaluer comme pour la température. Nous entendons souvent « il fait froid ou frais » mais rarement « l'air est sec ou humide » sauf dans des cas extrêmes.

En comparant les réponses obtenues en fonction du sexe, nous avons :

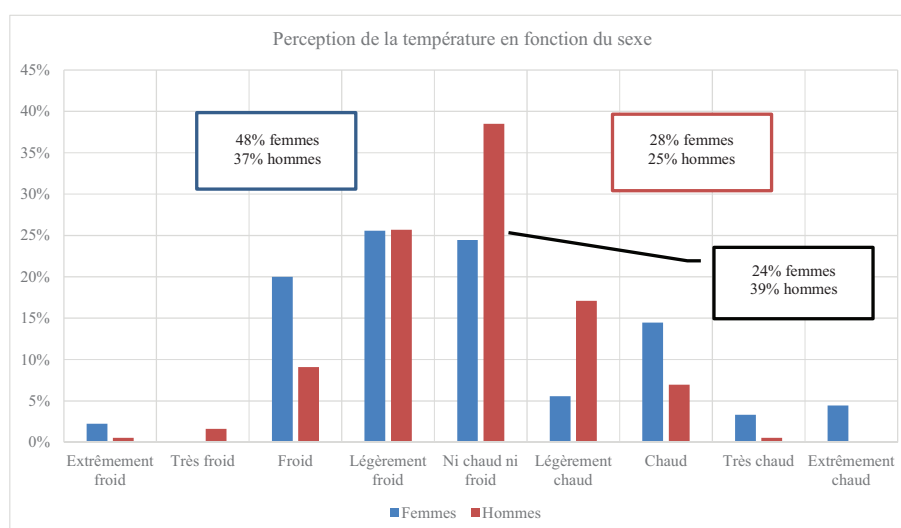


Figure 85. Perception de la température en fonction du sexe

Nous pouvons observer que les femmes sont plus sensibles au froid. 48% des réponses entre légèrement et extrêmement froid sont données par les femmes contre 37% pour les hommes. Du moment où la température est plus neutre (ni chaud, ni froid) ce sont les hommes qui sont plus satisfaits. Quand les températures commencent à augmenter, les réponses sont partagées, 28% pour les femmes et 25% pour les hommes. Nous avons vu que les valeurs de résistance thermique des vêtements étaient assez basses. Une mauvaise tenue vestimentaire peut influencer la perception de la température, la figure 86 montre la perception de la température quand la résistance thermique des vêtements est inférieure à 0.9 clo.

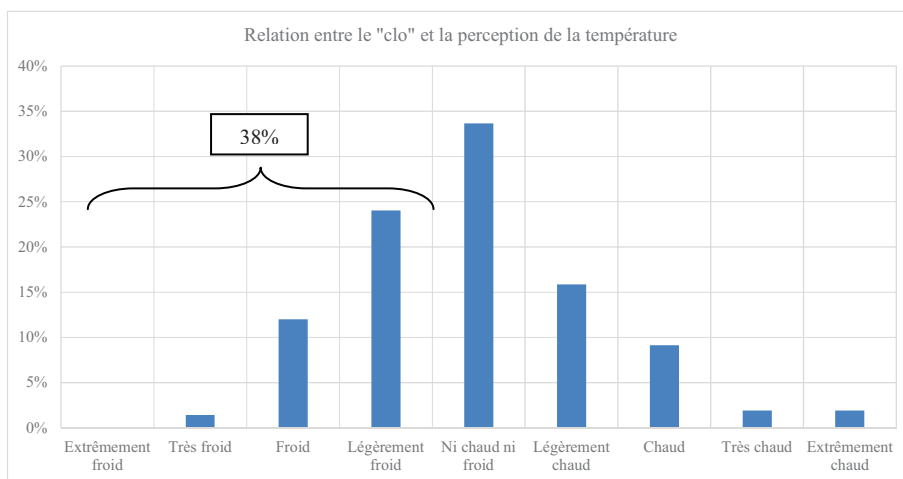


Figure 86. Relation entre la résistance thermique des vêtements et la perception de la température

La tenue vestimentaire joue sur le confort, puisque 38% des réponses considèrent que la température est assez froide. Une tenue vestimentaire plus adaptée pourrait permettre d'améliorer la perception de la température et probablement le taux de satisfaction.

3.1.3 Qualité de l'air intérieur ressentie

La qualité de l'air perçue par les occupants du bâtiment peut être considérée comme moyenne. Seulement 58% des personnes enquêtées ont perçu la qualité de l'air du bâtiment comme « bonne ». Environ 30% l'ont perçu comme « mauvaise » ou « légèrement mauvaise », la norme ISO 15251 (B 1.2 page 28) définit une échelle pour permettre de qualifier un bâtiment par rapport au taux d'insatisfaction, nous pouvons considérer que la Tour Elithis est dans la catégorie « C » puisque le pourcentage de personnes insatisfaites est d'environ 30%. La figure 87 présente la distribution des réponses.

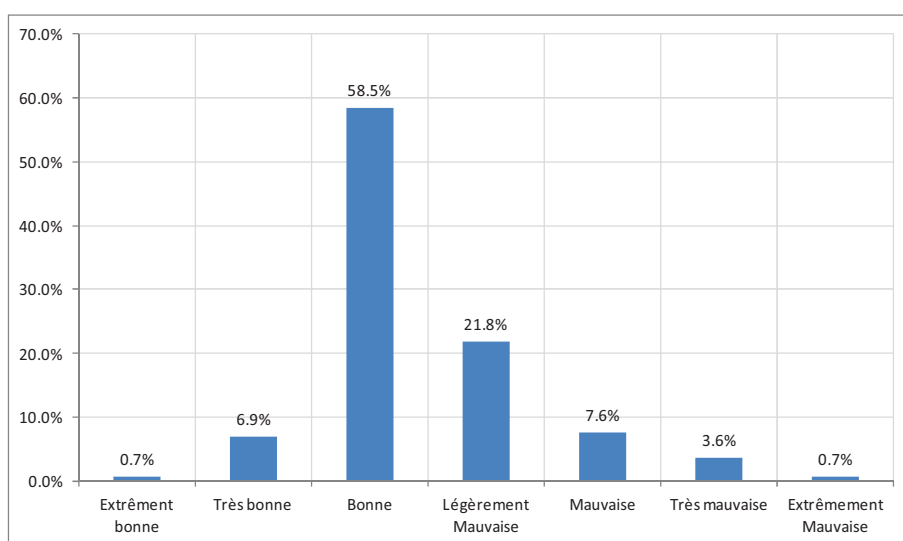


Figure 87. Perception de la qualité de l'air intérieur

Environ 40% des personnes ont ressenti des odeurs, telle que l'odeur corporelle, renfermée, nourriture, etc. Cela permettrait d'expliquer le taux d'insatisfaction. Des débits de ventilation probablement bas, et le scénario de fonctionnement de la ventilation (recyclage), contribueraient à la mauvaise qualité de l'air perçue dans le bâtiment. La figure 88 montre la distribution de réponses en fonction du type d'odeur perçue:

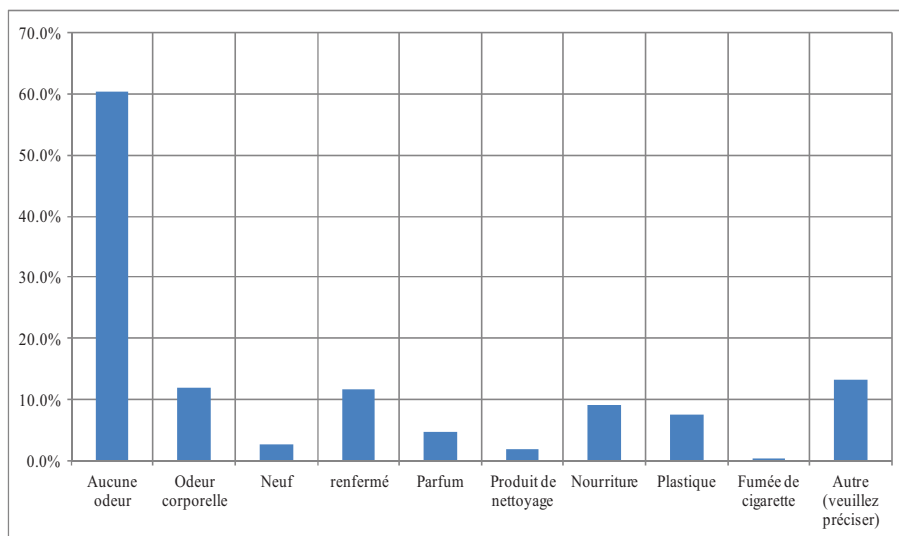


Figure 88. Perception des odeurs dans le bâtiment

Déterminer si la qualité de l'air dans le bâtiment est bonne ou mauvaise n'est pas possible en se basant seulement sur l'odeur. L'acceptation d'une odeur évolue avec le nombre d'inhalations (Jorgensen & Vestergaard, 1998) et n'a aucune relation avec un quelconque risque sanitaire. Dans la figure 88, nous observons clairement ce phénomène. De manière générale 60% des personnes interrogées ne ressentent pas une odeur en particulier, ce qui se traduit par la perception de la qualité de l'air.

3.1.4 Éclairage

L'éclairage dans le bâtiment est considéré comme « acceptable » par 50% des personnes. Malgré la surface vitrée du bâtiment le taux de satisfaction reste bas. Plusieurs choses ont été observées, à certaines périodes de l'année, l'éblouissement est souvent déclaré par les occupants, notamment dans les étages supérieurs (6 au 9), la proximité d'autres bâtiments fait que dans les étages plus bas, l'éclairage naturel reste faible, la puissance installée pour l'éclairage artificiel est très faible, cela ne permettrait pas de compenser le faible apport lumineux naturel extérieur.

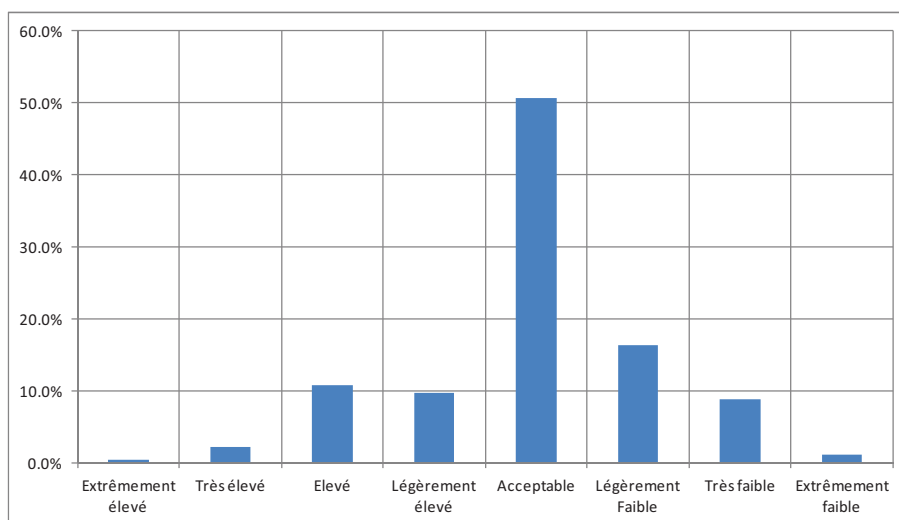


Figure 89. Perception de l'éclairage dans le bâtiment

3.1.5 Acoustique

La satisfaction au niveau du bruit n'est pas non plus parfaite, notamment dans les espaces ouverts (open space). La voix, le téléphone et la conversation téléphonique sont 3 types de bruit qui ont été déclarés souvent comme gênants.

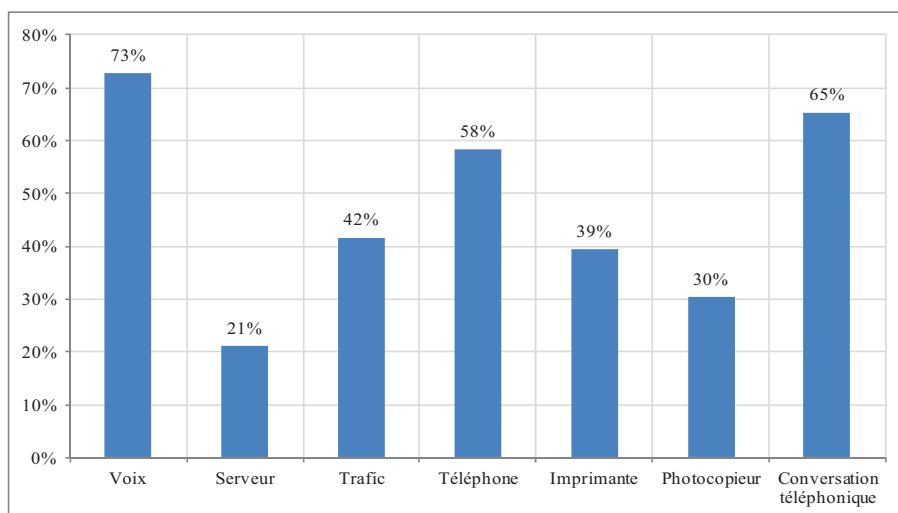


Figure 90. Perception des bruits dans le bâtiment

3.1.6 Qualité de l'environnement intérieur

De manière générale la qualité de l'espace au sein du bâtiment est partagée. La figure 91 présente la distribution des réponses obtenues au regard de la qualité des espaces intérieurs. En prenant les réponses « confortables » nous obtenons 68% de satisfaction, c'est un taux qui est faible et qui peut s'expliquer avec les autres critères déjà présentés.

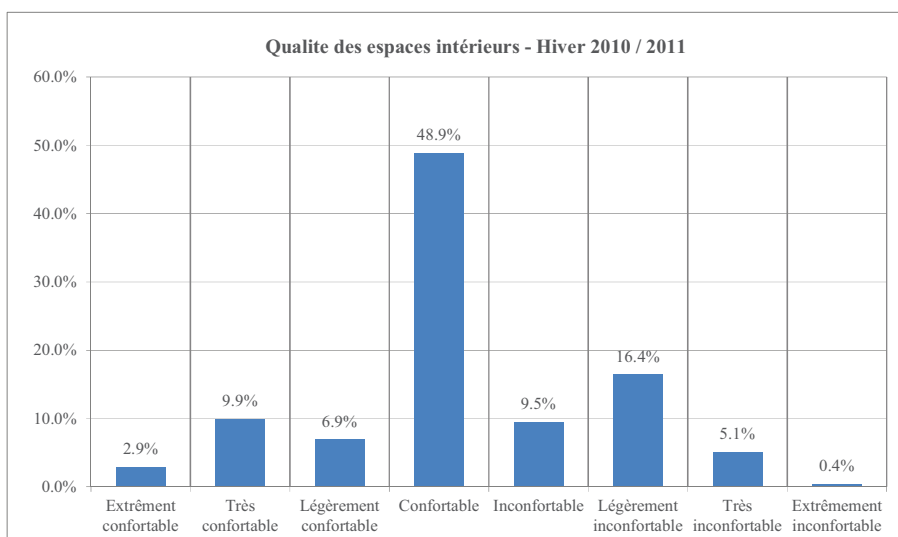


Figure 91. Perception de l'ambiance dans le bâtiment

3.1.7 Conclusion

Nous avons présenté les résultats obtenus dans cette première partie de l'enquête sur le confort dans le bâtiment Tour Elithis en hiver. Le bilan de manière générale est partagé, au niveau énergétique le bâtiment reste sobre malgré une consommation de plus en plus importante au niveau du chauffage. En revanche, cette performance est peut être obtenue en diminuant la qualité de l'ambiance intérieure. Au niveau du confort thermique, le taux de satisfaction est moyen 40% mais nous avons vu qu'une tenue vestimentaire plus adaptée aurait pu augmenter cette valeur. Au niveau de l'humidité, aucune conclusion ne peut être donnée, il est difficile d'estimer cette relation puisque le corps humain ne détecte pas facilement cette variante. Au niveau du confort visuel, la satisfaction est moyenne, 50%, dû en partie à une mauvaise gestion de l'éblouissement et un éclairage artificiel faible. Au niveau acoustique, la gestion du bruit dans les open-space reste un point faible. Quant à la qualité de l'air perçue, nous avons observé la présence d'odeurs et un taux de satisfaction assez moyen.

Un bâtiment économe en énergie n'est pas synonyme de confort thermique. La Tour Elithis est un exemple, la température de confort utilisé pour la conception n'a pas permis de garantir le confort des occupants, probablement le fait d'avoir une très large surface vitrée augmente les inconforts liés aux parois froides, la température de consigne du chauffage n'est apparemment pas suffisante. Une augmentation de la consigne a été apportée au système occasionnant une évolution de la consommation du bâtiment.

Pendant ce premier suivi, nous avons pu déterminer le niveau de confort du bâtiment en fonction des différents paramètres. Dans le tableau 22 nous résumons les résultats :

Tableau 22. Niveau de confort Tour Elithis – période hivernale 2010 - 2011

Critère	Taux de satisfaction
Température	48%
Humidité	70%
Qualité de l'air perçue	58.5%
Confort visuel	50%
Confort acoustique	47%
QEI générale	68.6%

3.2 Période estivale

Pendant la période hivernale, les occupants nous ont souvent déclaré, qu'il leur était parfois difficile de se positionner au niveau de l'échelle du confort, les choix « légèrement chaud ou froid » leur avait souvent posé des problèmes. C'est pour cette raison, que nous avons modifié le questionnaire pour le suivi de la saison estivale. Nous avons construit un questionnaire avec les usagers (Voir annexe 2), le choix de réponses a été choisi par eux-mêmes. Cela a pu être fait puisque les utilisateurs avaient compris la démarche et souhaitaient la rendre plus pratique. Nous avons donc, testé une autre manière d'analyse, nous la présentons ci-après.

Le suivi a été fait pendant la période estivale (d'Avril à Aout). Nous avons conservé les même thématiques, nous avons simplement modifié les échelles de réponses ainsi que quelques réponses. L'objectif n'est pas de comparer les résultats hiver et été mais de connaître le niveau de satisfaction sur deux périodes différentes. En ce qui concerne les informations de base, partie I période hivernale, nous avons conservé le même questionnaire. Pour les autres parties, nous présentons les détails dans les tableaux 23 à 25. Pour la température et l'humidité nous avons réduit l'échelle de réponse, ici nous nous sommes concentrés sur le confort de manière générale.

Tableau 23. Détail de question – Température/Humidité

Critère	QUESTION	ECHELLE
Température	Comment percevez-vous la température ambiante à ce moment précis?	Chaud Neutre Froid
	Trouvez-vous cela?	Confortable Inconfortable
Humidité	Comment ressentez-vous l'humidité ambiante ?	Humide Neutre Sèche
	Trouvez-vous cela?	Confortable Inconfortable
Courants d'air	Ressentez-vous un courant d'air....	Froid / Chaud, d'où provient-t-il ?
	Trouvez-vous cela?	Confortable Inconfortable

Pour la QAI, nous l'avons conservée, nous avons simplement modifié l'échelle de réponse de perception de la QAI, nous sommes passés de 7 à 3 niveaux de réponse.

Tableau 24. Détail de question - QAI

Critère	QUESTION	ECHELLE
QAI	Ressentez-vous des odeurs inhabituelles?	Oui / Non
	Comment caractérisez-vous les odeurs que vous percevez ?	Aucune odeur Odeur corporelle Neuf renfermé Parfum Produit de nettoyage Nourriture Plastique Fumée de cigarette Autre (veuillez préciser)
	Ressentez-vous une irritation des yeux, gorge ou du nez?	Oui / Non
	Ressentez-vous une sensation de fatigue?	Beaucoup Un peu Rien du tout
	En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?	Bonne Acceptable Mauvaise

Dans la dernière partie, nous nous sommes intéressés au confort visuel lié à l'éclairage naturel. Pendant cette période grâce à la surface vitrée le bâtiment bénéficie d'apports lumineux plus importants, l'éclairage artificiel ne fonctionne que peu de temps. Au niveau de l'acoustique, nous nous sommes intéressés au bruit de la ventilation car nous avons souhaité mettre en place des débits de ventilation plus importants. La disposition des locaux ainsi que l'occupation n'avaient pas varié. Au total 4 questions, le détail est présenté dans le tableau 18 :

Tableau 25. Détail de question - QEI

Critère	QUESTION	ECHELLE
QEI	Comment évaluez-vous le niveau d'éclairement actuellement? (Facultatif)	Élevé Acceptable Mauvais
	Le bruit de la ventilation vous paraît... (Facultatif)	Élevé Acceptable Faible
	En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?	Confortable Légèrement inconfortable Mauvaise

Au total, 138 réponses ont été récoltées, le taux réel de participation a été de 60%. Une diminution considérable a été constatée. C'est une méthode qui est répétitive ce qui la rend fastidieuse, les personnes étaient aussi moins disponibles puisque c'est aussi une période où l'activité est plus importante (bureau).

3.2.1 Bilan période estivale

- **Le sexe**

Nous avons observé la même répartition que pendant la période hivernale, la figure 92 montre le résultat:

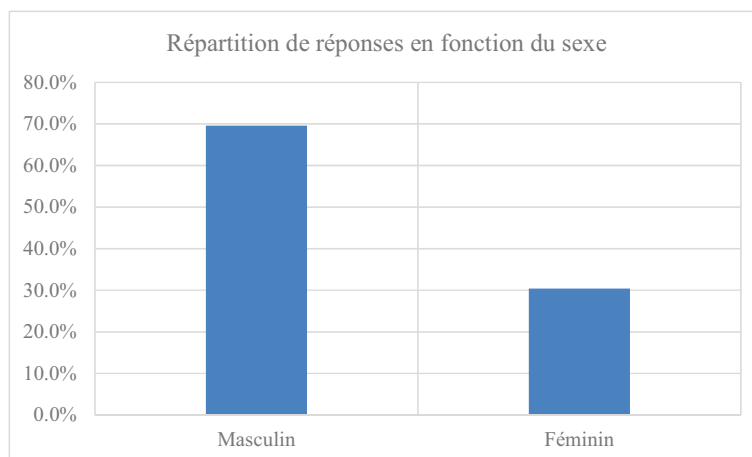


Figure 92. Répartition de réponses en fonction du sexe – Période estivale

- **Age**

Pour l'âge, nous avons obtenu les mêmes résultats, la figure 93 les montre :

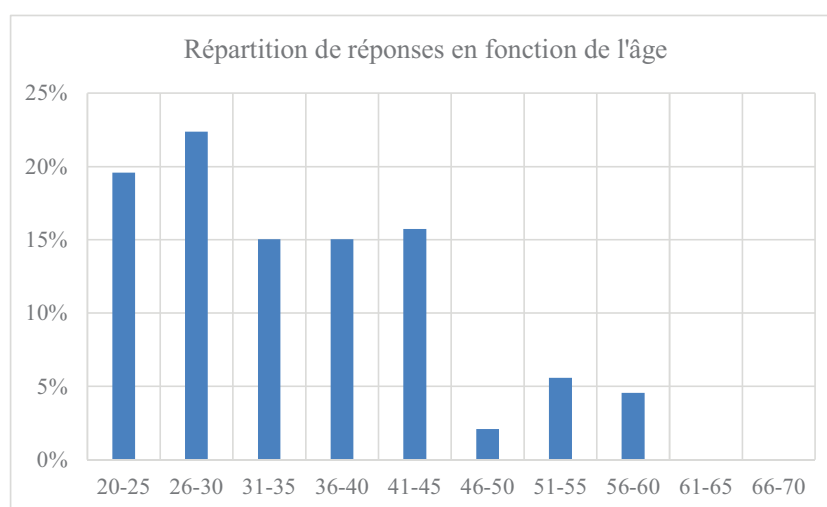


Figure 93. Répartition des réponses en fonction de l'âge

- **Étage**

Nous observons une légère diminution du taux de participation, dans les étages 4, 6, 7, 8 et 9. Pour le reste des étages, les occupants n'ont pas souhaité continuer avec cette démarche.

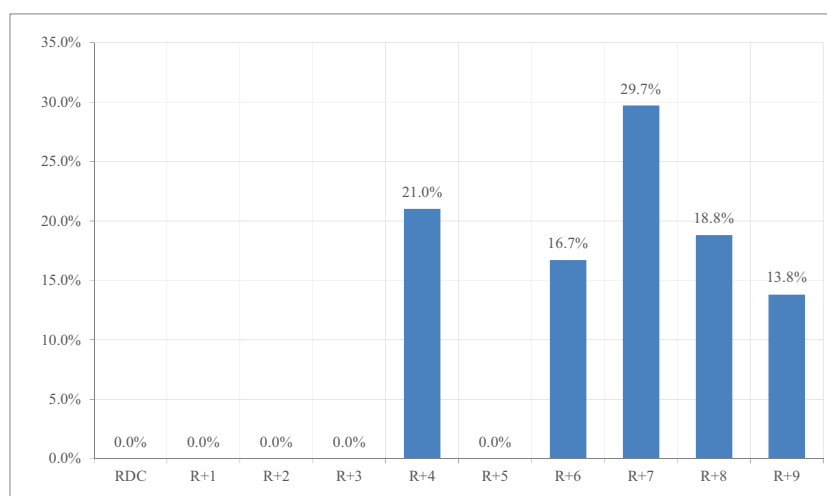


Figure 94. Répartition des réponses de fonction de l'étage - Hiver 2010-2011

- **Orientation**

La répartition des réponses en fonction de l'orientation n'a pas suivi de modification, les figures 95 et 96 montrent la distribution :

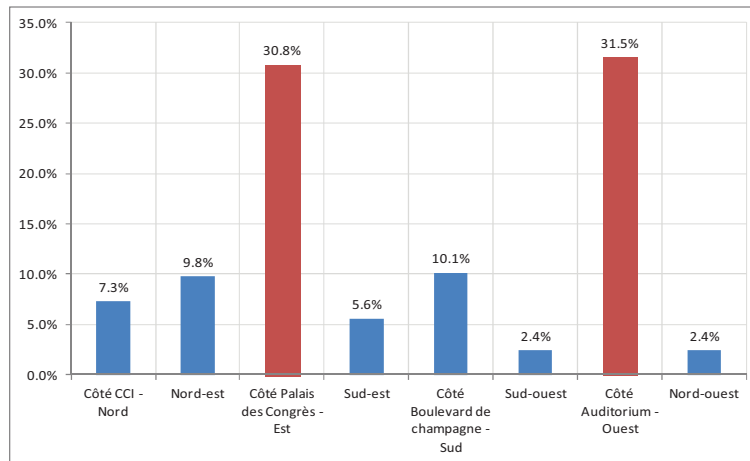


Figure 95. Répartition des réponses en fonction de l'orientation

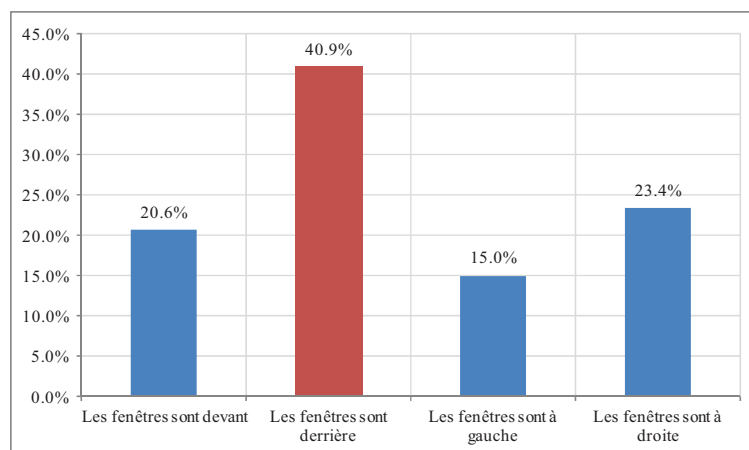


Figure 96. Répartition des réponses en fonction de la position des fenêtres

- **La tenue vestimentaire**

La valeur de résistance thermique des vêtements pour des températures estivales est de 0.5 clo (ASHRAE, 2010). La figure 97 montre la répartition des réponses par rapport à cette valeur moyenne :

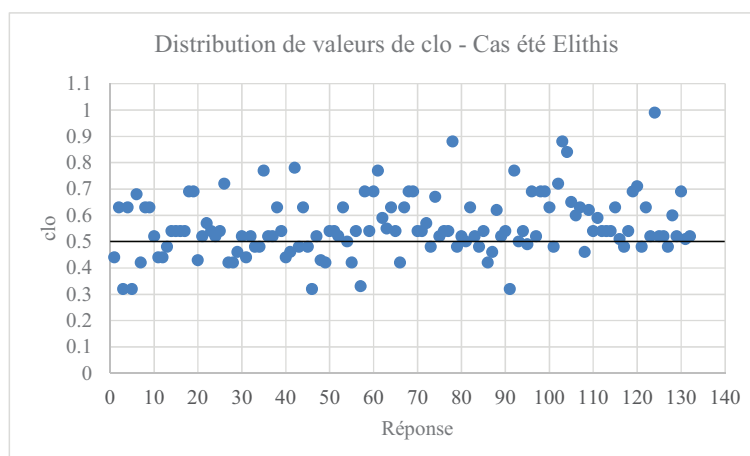


Figure 97. Répartition de valeurs de « clo »

Les valeurs sont plus proches de la valeur moyenne qu'en hiver. La valeur moyenne est pour notre échantillon de 0.56. Par rapport au cas hiver, la tenue vestimentaire est mieux adaptée, des valeurs très élevées ont cependant été observées mais de manière ponctuelle.

- **Activité**

La figure 98, présente la répartition des réponses en fonction de l'activité, nous n'observons pas de changement par rapport à l'enquête hiver.

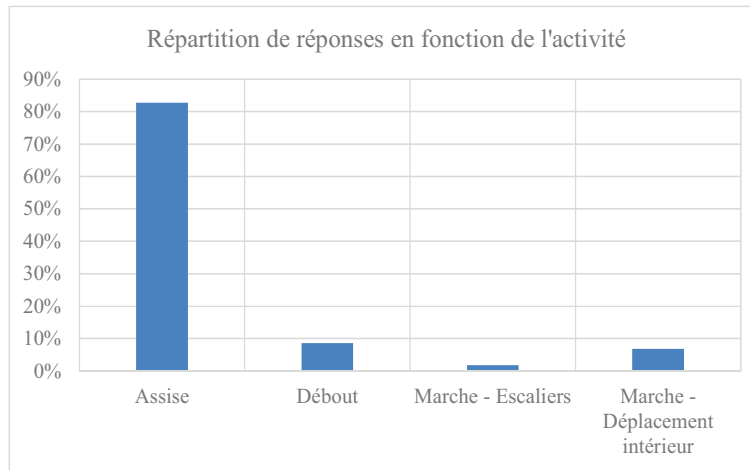


Figure 98. Répartition de réponses en fonction de l'activité

3.2.2 Bilan du confort thermique

La figure 99 présente les résultats obtenus pendant la période estivale :

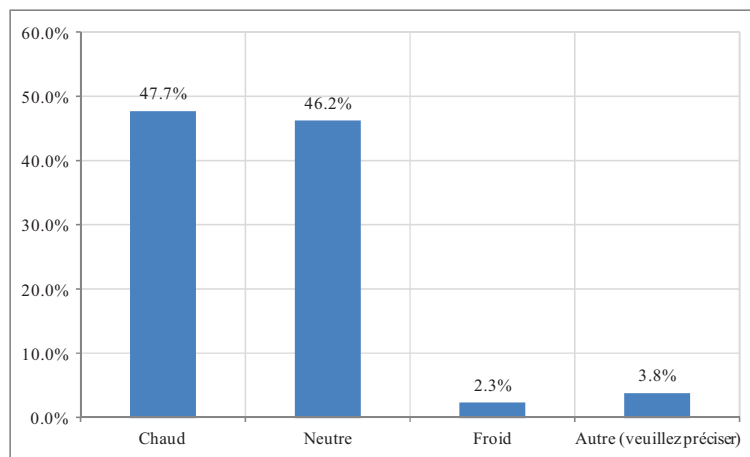


Figure 99. Bilan confort thermique période estivale

Nous pouvons observer un pourcentage très partagé de personnes qui ont répondu à cette enquête. La température est perçue par 47% des usagers comme chaude et seulement 46% la considèrent comme neutre. Le taux de satisfaction au regard des températures est le suivant :

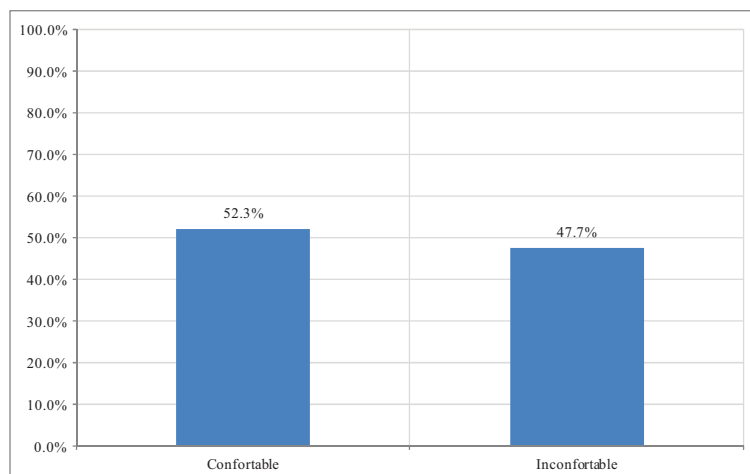


Figure 100. Taux de satisfaction période estivale

Nous pouvons observer un taux de satisfaction de 52% au regard des températures perçues ce qui reste faible. Pendant cette période, le système de rafraîchissement n'a pas été privilégié. Le fonctionnement du système de ventilation triple flux (voir section 1.1 fonctionnement de la ventilation) avait été choisi. Il a été observé que pendant les jours ensoleillés, ce système de ventilation n'était pas suffisamment efficace. La couleur noire de la façade fait que l'air quand il circule à l'intérieur des clapets se préchauffe, pouvant atteindre 30°C même si l'air extérieur restait frais

(20°C). De plus, le vent impacte aussi le fonctionnement, les débits attendus par entrée d'air ne sont pas suffisants à cause de la dépression exercée par le vent. La combinaison de ces phénomènes a joué probablement sur le confort.

- Bilan de courants d'air (Ventilation / infiltration)

Vis-à-vis des courants d'air, nous avons posé la question aux utilisateurs du bâtiment s'ils ressentaient un courant d'air froid et/ou chaud et comment ils se sentaient. Dans le premier graphique (figure 101) nous pouvons observer le résultat obtenu. Quand nous parlons des courants d'air, c'est tout mouvement d'air qui peut être gênant ou pas, cela peut provenir de la ventilation, des infiltrations d'air, fenêtres, etc.

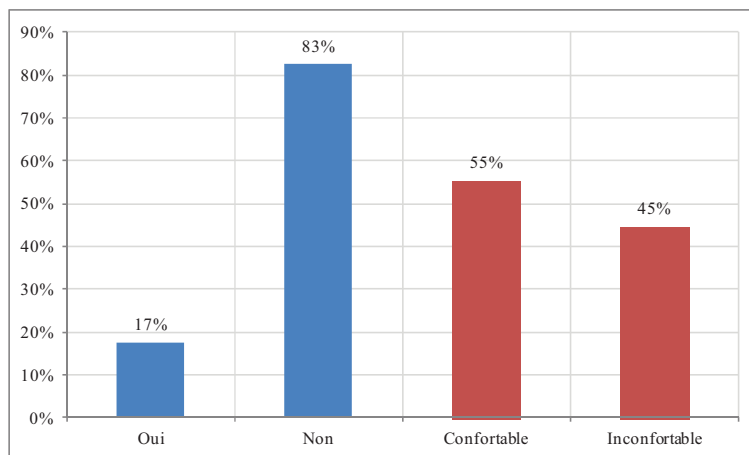


Figure 101. Perception des courants d'air froids

83% des personnes ont déclaré ne pas avoir ressenti un courant d'air froid mais 45% ne sont pas satisfaites. Cela peut être dû à la période, les températures sont plus élevées, un mouvement d'air peut donc, améliorer le confort des personnes.

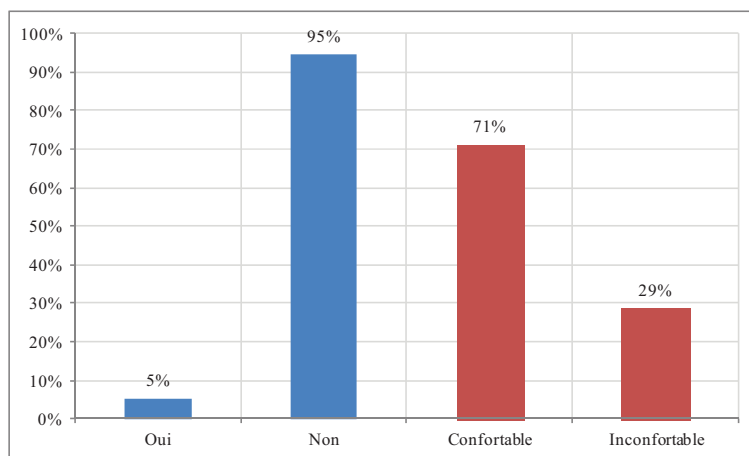


Figure 102. Perception des courants d'air chauds

Dans le cas des courants « chauds », 95% des occupants ont déclaré ne pas avoir ressenti un courant d'air chaud, ils sont 71% à être satisfaits. Les températures sont plus élevées, période estivale, les mouvements d'air chauds sont rares, le système de rafraîchissement peut induire, au contraire, un brassage d'air supplémentaire. Il est logique de retrouver un taux de satisfaction plus important avec l'absence de courants d'air « chauds ».

3.2.3 Bilan de l'humidité

La figure 103 présente les résultats obtenus :

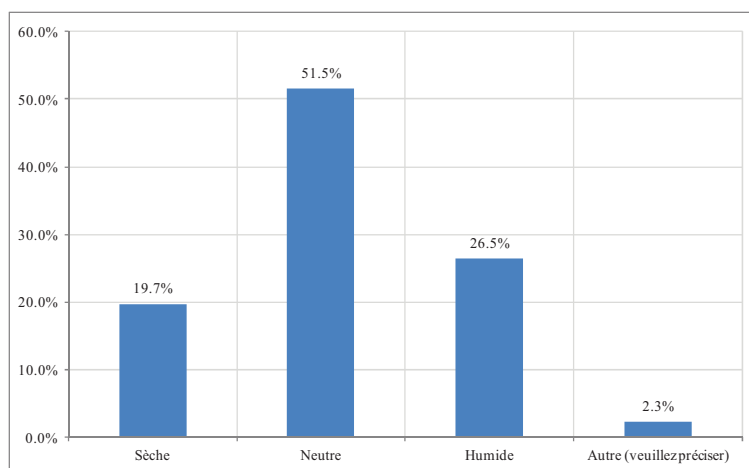


Figure 103. Perception de l'humidité dans le bâtiment

Plus de la moitié des personnes a déclaré une humidité neutre. Nous constatons un pourcentage plus élevé de personnes qui a déclaré ressentir un air plus humide. En ce qui concerne le taux de satisfaction vis-à-vis de ces résultats, les réponses sont très partagées comme la figure 104 le montre :

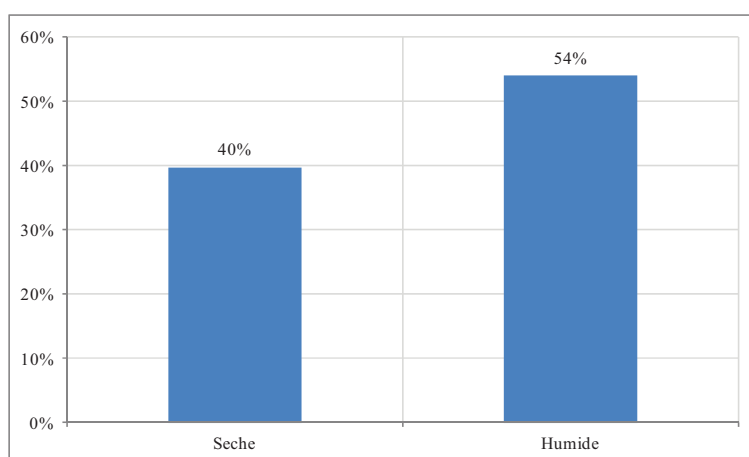


Figure 104. Taux d'insatisfaction vis-à-vis de l'humidité

Le graphique précédent montre le taux d'inconfort quand l'air est considéré comme « sec » et « humide ». L'inconfort est plus important quand l'air a tendance à être humide, cela semble logique car les températures sont plus élevées.

3.2.4 Qualité de l'air intérieur ressentie

La qualité de l'air ressentie du bâtiment pendant cette période est moyenne. Seulement 13% des personnes la considère comme bonne, 51% la trouve acceptable et 36% mauvaise.

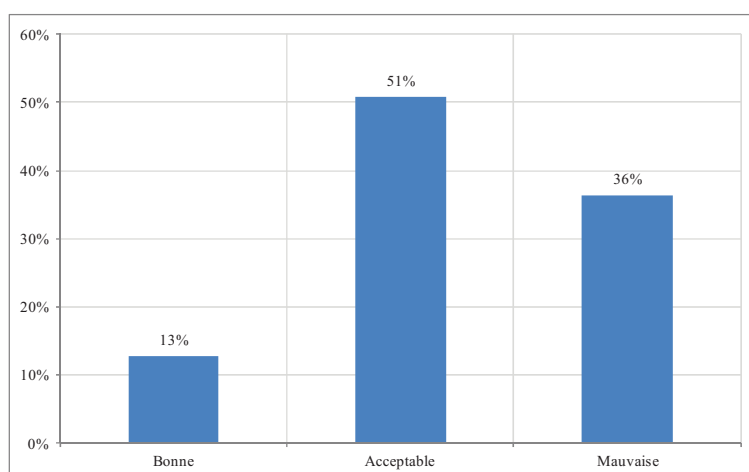


Figure 105. Perception de la qualité de l'air dans le bâtiment

Beaucoup de commentaires ont été fait à propos du manque d'air dans le bâtiment, les personnes souhaitaient avoir plus d'air. Le fait d'avoir trouvé un taux d'insatisfaction élevé vis-à-vis de la qualité de l'air, peut être lié en grande partie à la mauvaise ventilation du bâtiment. Les concentrations de polluants augmentent, diminuant ainsi la QAI. La figure 106 montre la distribution des symptômes :

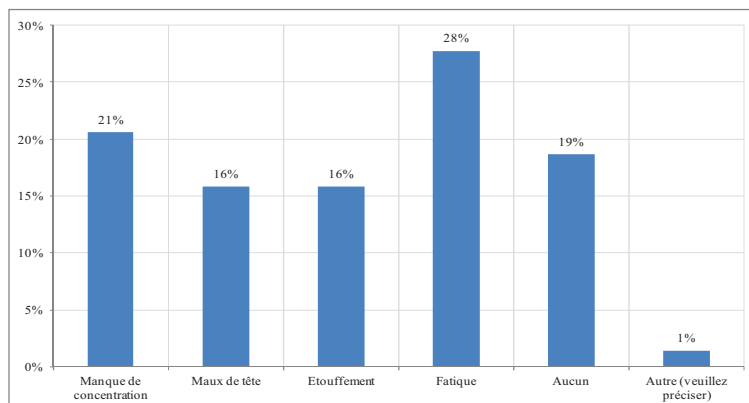


Figure 106. Répartition de réponses en fonction des symptômes

La fatigue et le manque de concentration sont souvent cités, symptômes qui peuvent être associés à un renouvellement d'air insuffisant. Au niveau des odeurs la figure 107 montre les résultats :

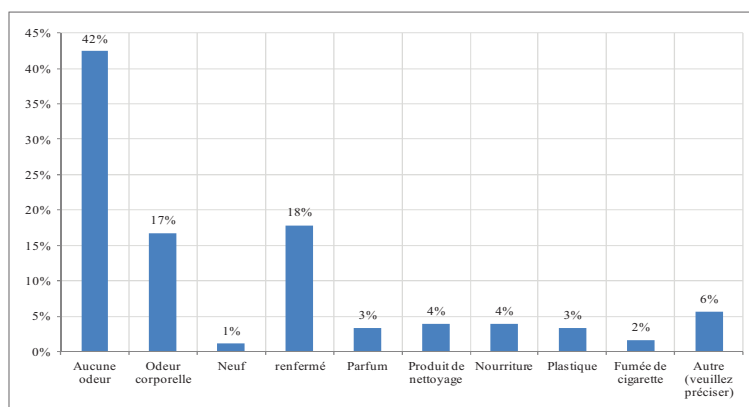


Figure 107. Répartition des réponses en fonction des symptômes et odeurs

Nous pouvons observer une augmentation significative de la présence des odeurs, « corporelle et renfermé ». Nous avons vu dans l'analyse de réponses du confort thermique, des constats avaient été faits vis-à-vis des débits de ventilation, l'air intérieur n'était pas assez renouvelé ce qui a provoqué une diminution de la qualité de l'air dans le bâtiment.

3.2.5 Éclairage

Le bâtiment a une surface vitrée très importante, ce qui favorise la lumière naturelle. Avec les jours plus ensoleillés, l'éclairage est par conséquent plus important, les occupants ont été satisfaits. La figure 108 résume les réponses.

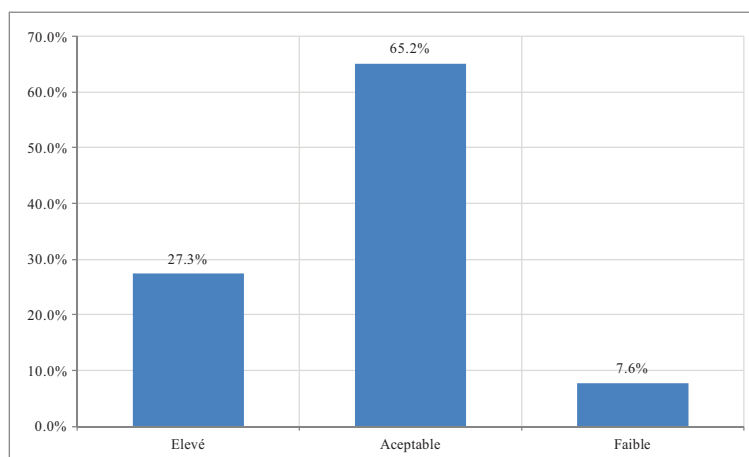


Figure 108. Taux de satisfaction vis-à-vis de l'éclairage

De manière générale 65% des occupants sont satisfaits du niveau d'éclairage. Les 27.3% qui avaient déclaré un éclairage élevé était lié à un phénomène d'éblouissement. Depuis cette enquête, des stores de protection intérieurs ont été ajoutés mais seulement dans la partie qui n'est pas protégée par le bouclier. D'autres endroits présentent toujours des problèmes d'éblouissement notamment en mi-saison.

3.2.6 Acoustique

Nous n'avons pas fait un suivi du bruit pendant cette période, le travail mené en première partie (hiver), a permis de faire un constat, aucune modification dans ce sens a été apporté dans le bâtiment. Dans cette partie, nous nous sommes focalisé sur le bruit de la ventilation, la figure 109 montre les réponses :

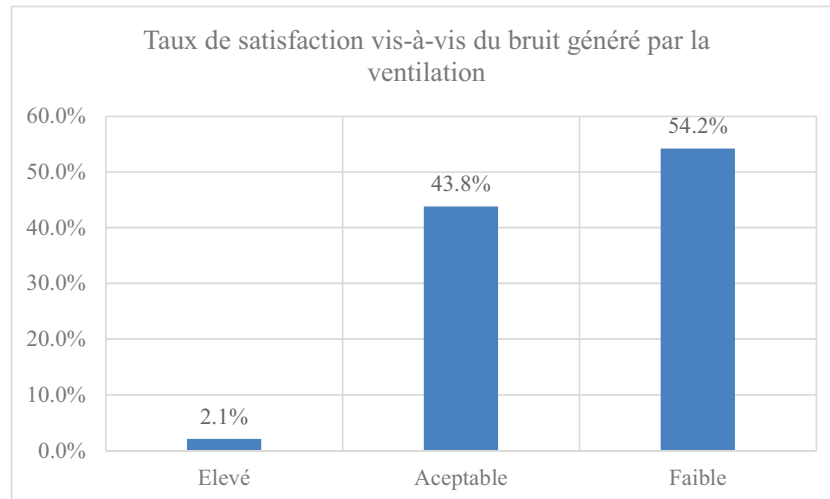


Figure 109. Taux de satisfaction vis-à-vis de la ventilation

De manière générale, nous constatons que le bruit généré par la ventilation est faible (2%). Dans ce sens une modification des débits de ventilation avait pu être proposée.

3.2.7 Qualité de l'environnement intérieur

De manière générale, nous avons posé la question aux utilisateurs du bâtiment pour connaître leur vision sur la qualité de l'environnement. Ils devaient évaluer la qualité de l'environnement d'un point de vue global. La figure 110 présente le résultat :

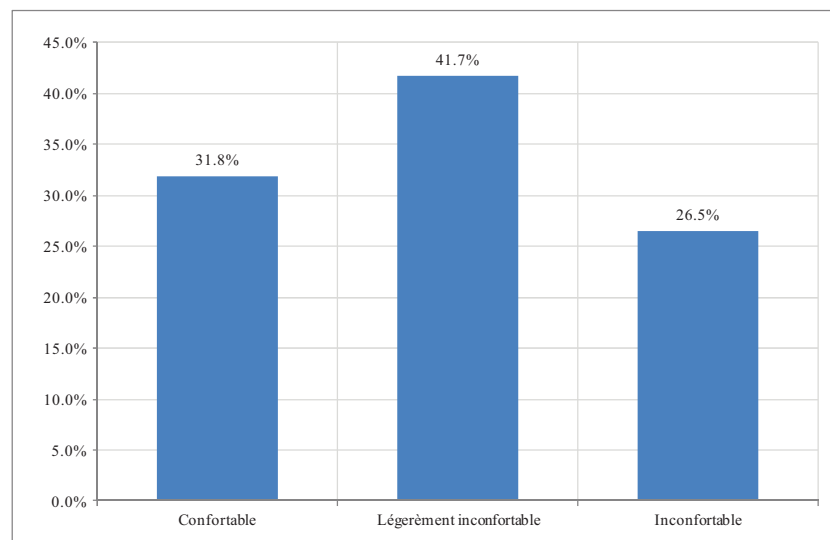


Figure 110. Taux de satisfaction vis-à-vis de l'ambiance intérieure

Le taux de satisfaction pendant cette période est de 31.3% ce qui reste très faible. Un nombre de réponses « légèrement inconfortable » qui s'expliquent par des températures plus élevées, l'éblouissement et une mauvaise QAI. Pendant ce premier suivi, nous avons pu déterminer le niveau de confort du bâtiment en fonction des différents paramètres.

Pendant le travail de suivi de cette période, nous avons constaté un problème de fonctionnement de la ventilation triple flux, les températures ainsi que les débits n'étaient pas suffisants, ce qui a provoqué une modification du confort thermique et de la qualité de l'air perçue. Dans le tableau 26 nous résumons les résultats :

Tableau 26. Niveau de confort Tour Elithis – période hivernale 2010 - 2011

Critère	Taux de satisfaction
Température	52.3%
Humidité	54%
Qualité de l'air perçue	64%
Confort visuel	65%
Confort acoustique (Ventilation)	43.8%
QEI générale	31.8%

3.3 Conclusions

Ce travail nous a permis de déterminer, la qualité de l'ambiance au sein de la Tour Elithis, en nous basant sur les critères de confort, hygrothermique, visuel, olfactif et acoustique. Nous avons défini un niveau de confort pour deux périodes, hiver et été.

La nécessité d'une organisation particulière, la diffusion et le traitement des résultats rendent ce travail de suivi assez délicat. Le nombre de personnes interrogées a compliqué aussi la tâche. Le mode de diffusion que nous avons adopté nous a permis d'avoir un retour relativement important et de protéger l'anonymat des occupants.

Bien que les taux de satisfaction n'aient pas été aussi bons que nous l'aurions espéré, nous avons pu observer des situations qui ont pu jouer sur le résultat. Par exemple, la tenue vestimentaire ou les problèmes de fonctionnement de la ventilation triple flux, pendant la saison estivale.

De manière générale, ce bâtiment présente un bilan énergétique très intéressant mais en termes de QEI, les résultats ne sont pas tout à fait satisfaisants.

Dans l'analyse du confort, il existe un nombre de paramètres qui influencent le taux de satisfaction (activité, âge, tenue, sexe, orientation) chaque paramètre joue de manière différente sur la réponse. La méthode du PMV ne s'adapte pas à toutes les situations et populations, elle est intéressante mais nécessite un travail d'analyse bien précise.

4. ETUDES DE LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR

Dans la littérature peu d'information existe sur la qualité de l'air dans les bâtiments de bureaux. Afin de nous créer notre propre base de données et de compléter le suivi réalisé sur le confort, nous avons défini un protocole de suivi de la Qualité de l'Air Intérieur de la Tour Elithis. Ce suivi nous a permis d'identifier les polluants dans l'air intérieur et d'identifier si les concentrations dépassaient les valeurs guides.

Nous avons réalisé une campagne de mesure de la qualité de l'air intérieur et extérieur, celle-ci a été faite avec le soutien de l'ADEME Bourgogne (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), l'ASPA (Association pour la surveillance de la pollution atmosphérique en Alsace), le LaSIE (Laboratoire de Sciences pour l'Ingénieur et l'Environnement de la Rochelle) et Atmosf'air Bourgogne.

Afin de mieux comprendre l'évolution de la qualité de l'air, nous avons défini trois semaines d'analyse, hiver, mi-saison et été. Nous retrouvons donc, un mode de ventilation pour l'hiver, double flux avec récupération de la chaleur, pour l'été, double flux sans récupération de la chaleur (by-pass) et pour la mi-saison, simple flux. Ces trois modes de fonctionnement ont été expliqués dans le chapitre II.

Les objectifs de ce travail étaient les suivantes :

- Déterminer le transfert de la pollution extérieure vers l'intérieur
- Comprendre l'évolution de la QAI avec les saisons et pendant l'occupation
- Déterminer la composition de l'air intérieur (COV et aldéhydes)
- Comprendre l'influence de la ventilation sur la QAI

Le travail a été donc, divisé en 2 parties, air extérieur et air intérieur.

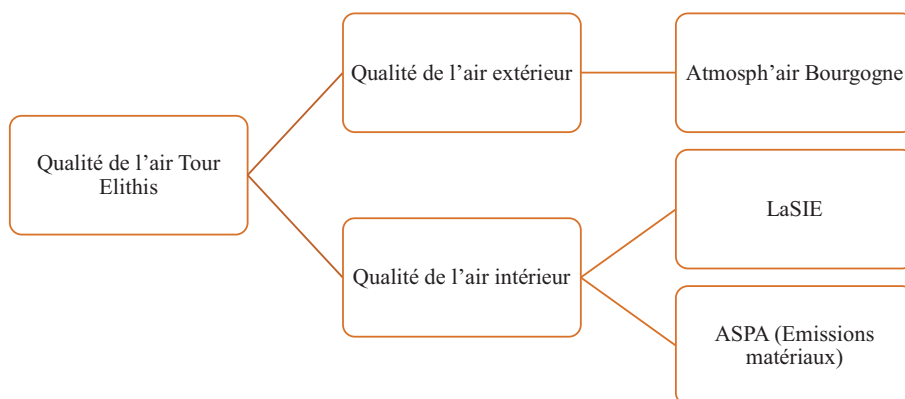


Figure 111. Méthodologie d'analyse de la QAI

Dans une première partie, nous avons travaillé avec Atmosf'air Bourgogne qui a mesuré les polluants atmosphériques à l'extérieur du bâtiment, en parallèle, un suivi a été fait à l'intérieur pour déterminer le transfert des polluants. Dans un deuxième temps, l'ASPA, a fait des mesures d'émissions des matériaux afin de déterminer les sources de pollution intérieures. En dernière partie, le LaSIE a fait des prélèvements de l'air intérieur pour déterminer sa composition.

4.1 Métrologie et méthodologie d'analyse

4.1.1 Analyse de l'air extérieur (Atmosf'air Bourgogne)

De façon à étudier les transferts des polluants de l'air extérieur vers l'ambiance intérieure, des appareils de mesure ont été placés à l'extérieur du bâtiment, (figure 105 et 106) et à l'intérieur du 4^{ème} étage (Figure 107 et 108). 3 types de polluants ont été surveillés, les dioxydes d'azote, l'ozone et les particules fines PM 2.5.

Les périodes d'analyse ont été les suivantes :

Hiver : Du 4 au 8 février 2013

Mi-saison : Du 22 au 24 avril 2013

Été : Du 17 au 21 septembre 2012

Pour la partie extérieure, l'appareil qui a été utilisé est un analyseur par radiométrie Béta type MP101M, il a été placé sur la toiture de l'auditorium, figure 112, il a permis de mesurer les matières en suspension dans l'air ambiant, une tête de prélèvement chauffée capte les « poussières respirables », celles-ci se déposent sur un filtre en papier fibre de verre pour ensuite par des rayons bêta déduire la masse de particules.

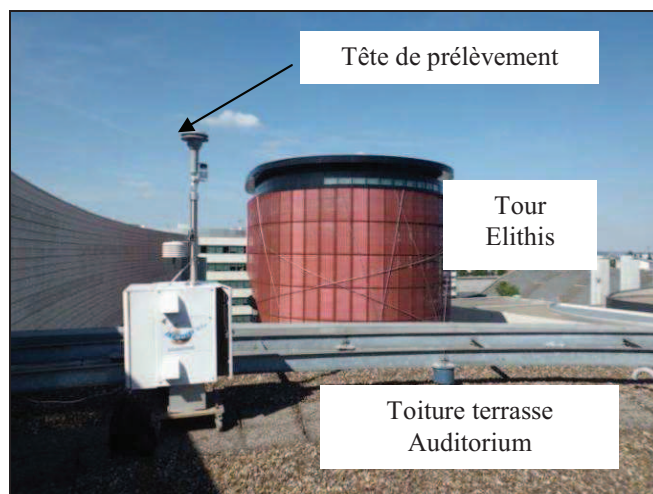


Figure 112. Analyseur Particules fines

Pour l'ozone et les NO_x un appareil a été placé dans un local sur un bâtiment en face de la Tour Elithis (figure 106). Pour l'analyseur de PM il a été installé dans une toiture terrasse en face de la Tour Elithis (figure 112).



Figure 113. Analyseur Ozone et Dioxyde d'azote

Pour corrélérer ces données avec l'air intérieur des prélèvements ont été faits au 4^{ème} étage de la Tour Elithis, figure 113, 114 et 115, les NO_x , l' O_3 et les $\text{PM}_{2.5}$ ont été aussi surveillés. L'appareil qui a permis de mesurer l'ozone à l'intérieur du bâtiment a été mis dans une salle de reproduction, pour les NO_x et $\text{PM}_{2.5}$, un appareil a été placé dans une salle de réunion. Les images suivantes montrent l'emplacement des appareils.

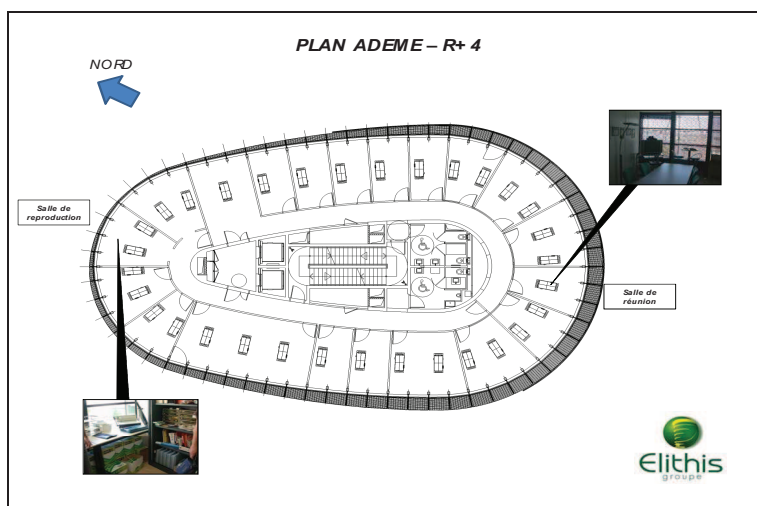


Figure 114. Localisation des appareils (NO_x -Ozone)



Figure 115. Analyseurs de Dioxyde d'azote et d'Ozone

4.1.2 Analyse des émissions de matériaux (ASPA)

Des prélèvements sur les matériaux ont été réalisés complétés par des tubes passifs type RADIELLO®, les prélèvements ont été réalisés sur :

- Les murs (cloisons intérieures)
- Les faux plafonds
- Les tables
- Les chaises
- Les murs intérieurs en bois
- Le sol

Les séries de prélèvements ont été réalisées sur 3 jours entre les 10 et 12 septembre 2012. Ces analyses ont été réalisées avec un appareil qui permet de faire des prélèvements directement sur les matériaux, la cellule FLEC® (Fuels and Laboratory Emission Cell). C'est une cellule en forme de cloche d'un volume interne de 35ml qui se place sur la surface du matériau à tester et qui permet de mesurer sur site les polluants émis. L'ensemble forme un volume étanche à l'air ambiant. De l'air propre (1) est soufflé vers l'intérieur d'une « cloche » (2) cet air rentre en contact avec le matériau, ensuite il est aspiré au milieu de cette « cloche » (3), « la cloche » se trouve en surpression afin d'éviter tout contact avec l'air extérieur (pièce). Cela permet un flux de polluant provenant des matériaux. Des capteurs passifs sont placés à la sortie de cet appareil pour mesurer les concentrations des polluants.

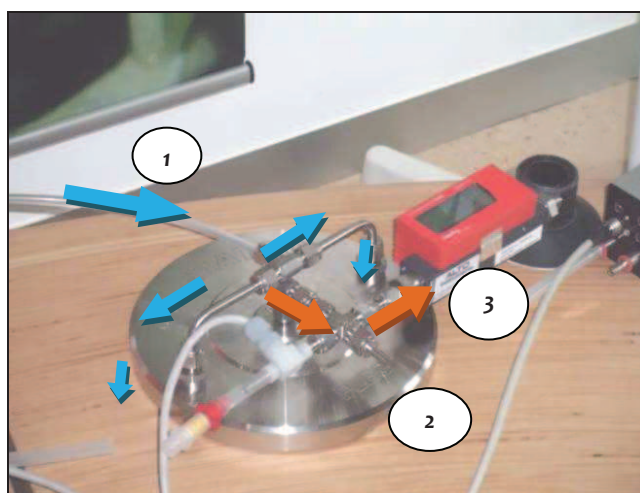


Figure 116. Analyseur des matériaux

4.1.3 Analyse de l'air intérieur – LASIE

L'analyse de l'air a été faite par prélèvement. Par le biais d'une pompe type KNF N810 FT.18 (figure 117), des sacs inertes ont été remplis avec de l'air 3 fois par jour pendant une semaine. Les sacs sont envoyés directement au laboratoire afin de réaliser l'analyse de l'air. L'objectif est de décrire l'évolution de la QAI pendant les heures d'occupation et d'étudier l'impact de la ventilation.

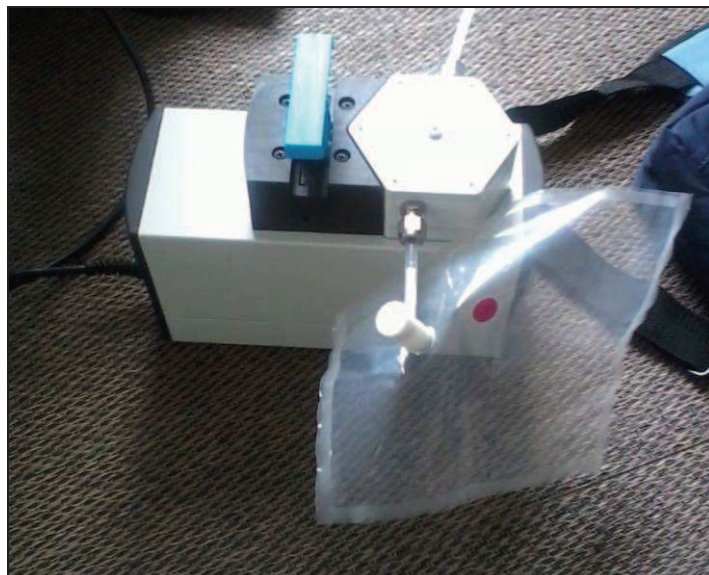


Figure 117. Pompe de prélèvement d'air

Les prélèvements ont été faits au 4^{ème} étage et au 9^{ème} étage (Figure 118 et 119) sur 3 semaines représentatives (été, hiver, mi-saison). Environ 8 prélèvements par jour entre 7h et 16h. Nous avons décidé de faire ces analyses dans deux étages différents pour pouvoir ainsi comparer et voir si des différences existaient. Dans les figures ci-dessus nous présentons les emplacements qui ont été définis. Il a été difficile de réaliser plusieurs prélèvements à plusieurs endroits de chaque étage, c'est pour cela, que nous avons défini avec le LaSIE les endroits les plus pertinents.

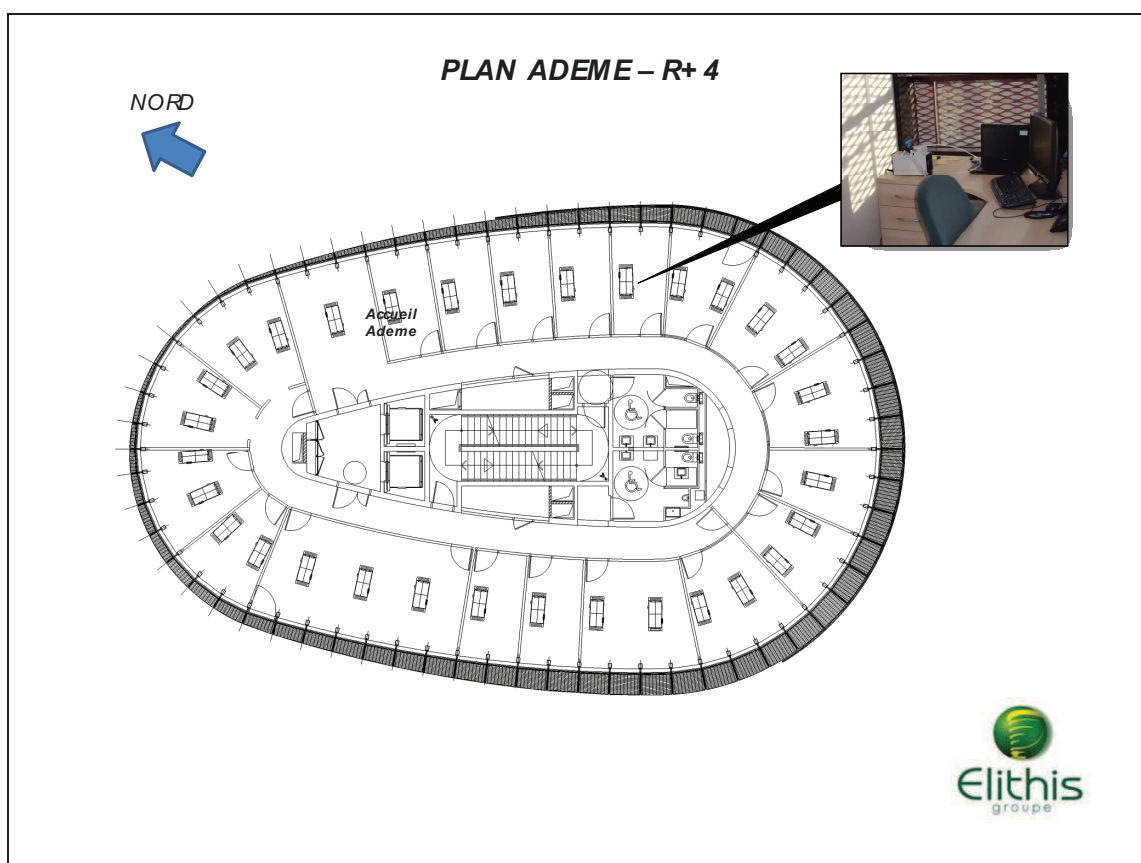


Figure 118. Localisation prélèvement étage 4.

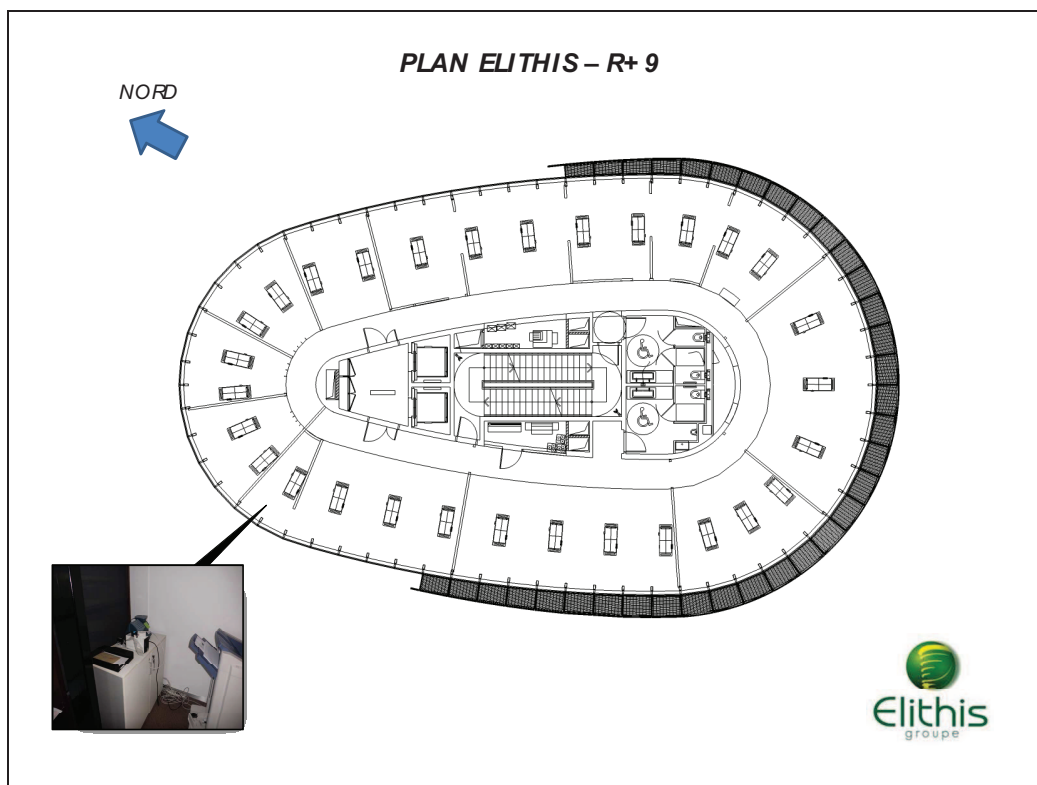


Figure 119. Localisation prélèvement étage 9.

La répartition des prélèvements est présentée dans le tableau 26 :

Tableau 27. N° des prélèvements faits sur l'air intérieur

	ÉTÉ	HIVER	MI-SAISON
	oct-2012	févr-2013	avr-2013
Lundi	08/10/2012	11/02/2013	22/04/2013
Mardi	02/10/2012	12/02/2013	23/04/2013
Mercredi	03/10/2012	13/02/2013	24/04/2013
Jeudi	04/10/2012	14/02/2013	25/04/2013
Vendredi	05/10/2012	15/02/2013	26/04/2013
Samedi	06/10/2012	09/02/2013	-
Dimanche	07/10/2012	10/02/2013	-
N° Prélèvements	52	52	46

Au total 150 prélèvements ont été réalisés, distribués sur trois semaines. Le weekend de la semaine mi-saison, n'a pas pu être réalisé suite à un problème de logistique.

4.2 Résultats suivi Atmosf'air

4.2.1 Air extérieur

Les travaux réalisés par Atmosf'air Bourgogne ont permis d'analyser l'évolution de la concentration des NO_x , des particules fines et de l'Ozone dans l'air extérieur et intérieur pour ainsi déterminer leurs évolutions (Atmosf'air, 2013). Ces polluants sont considérés comme cancérigènes, d'où l'importance de pouvoir comprendre leur évolution. Les résultats sont présentés dans la figure 120 :

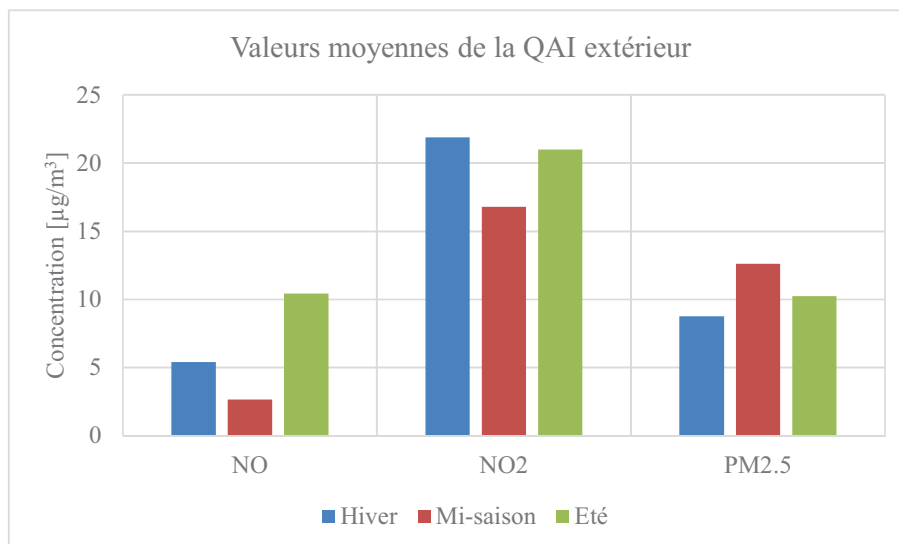


Figure 120. Valeurs moyennes des polluants extérieurs

Nous pouvons observer des différences pour les NO_x , en mi-saison les valeurs mesurées sont les plus faibles, pendant la semaine d'été, nous observons une augmentation des concentrations. En ce qui concerne les NO_2 les valeurs sont plus importantes, une diminution a été observée pendant la mi-saison. Pour le cas des $\text{PM}_{2.5}$, les mesures sont plus constantes sur les trois périodes. De manière générale, la qualité de l'air extérieur peut être considéré comme très bonne pendant la période d'analyse. Les valeurs observées sont très en-dessous des valeurs limites, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyennes horaires à ne pas dépasser pour les NO_2 et $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les $\text{PM}_{2.5}$. En prenant les valeurs de la figure 123, nous observons que les mesures sont en dessous de ces valeurs limites mais pour le cas de $\text{PM}_{2.5}$, même si les valeurs sont en dessous, elles sont proches des valeurs limites. Nous nous intéressons donc, aux particules fines. Nous avons vu dans le chapitre II (figure 18) que l'impact sanitaire lié aux particules fines est très important. Pour notre cas les valeurs sont faibles à l'extérieur mais pour d'autres villes ou régions le constat peut être bien différent.

4.2.2 Résultats air intérieur

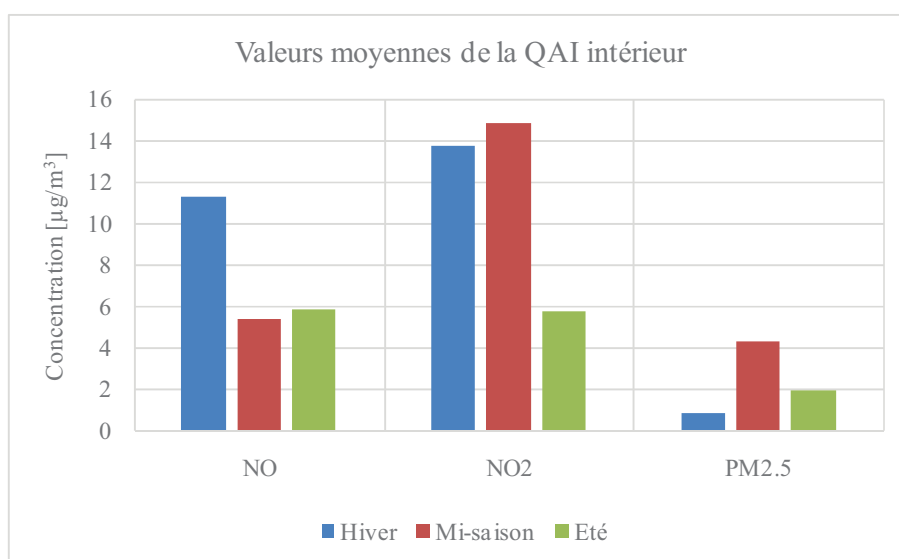


Figure 121. Valeurs moyennes des polluants extérieurs dans l'air intérieur

Les valeurs observées pour les NO_x présentent de grandes différences entre les saisons. Conclure quant à leur évolution est difficile. En revanche, au niveau des particules fines, nous observons un comportement qui peut

s'expliquer avec le fonctionnement de la ventilation. En mi-saison, le mode de fonctionnement de la ventilation est le simple flux, l'air extérieur n'est pas filtré, il rentre par les façades directement dans les étages. Pendant les périodes hiver ou été, le double flux est utilisé et l'air est filtré avant d'être introduit dans les bureaux ce qui peut expliquer de plus faibles concentrations en particules fines.

4.2.3 Synthèse

Le transfert des polluants (T) entre l'extérieur et l'intérieur peut être défini par le ratio suivant :

$$T = \left(\frac{C_I}{C_E} \right)$$

A partir de cette équation, nous pouvons déterminer un ratio pour chaque polluant :

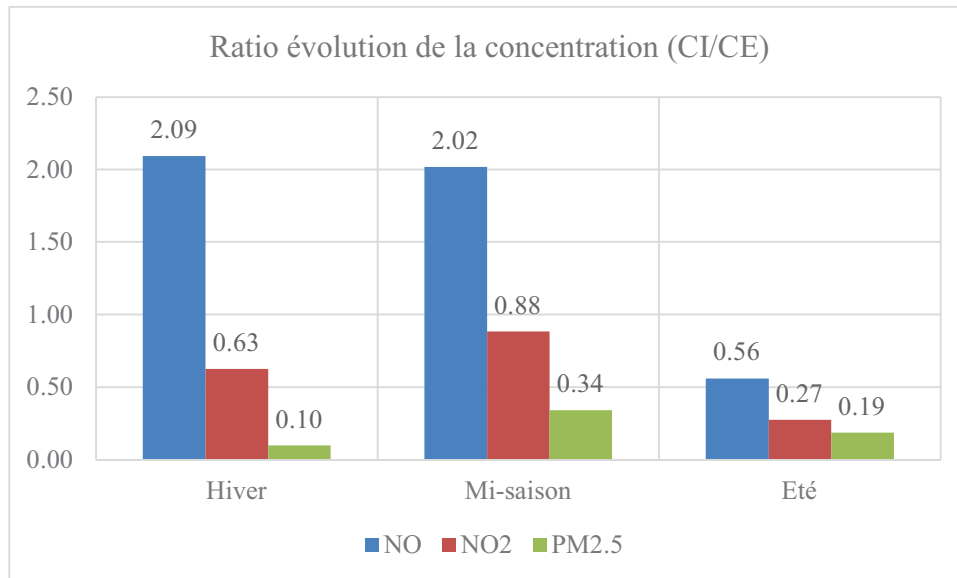


Figure 122. Ratios de transfert de la pollution extérieure vers l'air intérieur

Pour le NO, nous pouvons observer des valeurs négatives, cela veut dire, que les valeurs dans l'air intérieur sont plus importantes que dans l'air extérieur, des sources intérieures pourraient expliquer les différences mais entre les trois périodes il n'y a pas de relation. Pour le NO₂, nous pouvons observer une évolution qui pourrait s'expliquer avec le mode de fonctionnement de la ventilation mais ce gaz ne peut pas être filtré de manière classique, un débit de ventilation moins importante pourrait expliquer les différences mais cela reste une hypothèse. En ce qui concerne les particules fines, nous observons une évolution qui s'explique avec le mode de fonctionnement de la ventilation. En hiver, le mode de fonctionnement de la ventilation privilégiait le recyclage, le volume d'air frais était moins important, un ratio de transfert de 0.1 est observée. En mi-saison, le mode de fonctionnement simple flux, ne permet pas une filtration de l'air, un ratio de 0.34 peut être logique. En été, le 0.19, s'explique dans le mode de fonctionnement bien qu'il soit double flux (filtration de l'air), le scénario utilisé était tout air neuf sur une période plus longue (7-19h), le volume d'air est plus important par conséquent le nombre de particules augmente.

Les mesures effectuées au sein de la Tour Elithis ont montré que les concentrations de particules fines à l'intérieur sont plus faibles qu'à l'extérieur de 10% à 19%, pour le cas du système double flux avec récupération de chaleur et 34% pour le cas d'un système de ventilation simple flux. Les 34% observés dans la Tour Elithis sont cohérents par rapport aux travaux de Jarimska (Jarimska, 2000). Ses résultats nous serviront pour la modélisation de la qualité de l'air extérieur.

4.3 Résultats analyses LaSIE - Composés organique volatiles (COV) et aldéhydes

L'OQAI (Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur) a présenté un classement des polluants pour les bâtiments de bureaux. Ils sont classés en fonction de leur risque pour la santé et leur détectabilité. La liste est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 28. Classement de polluants (OQAI)

Hautement prioritaires	Benzène
	PM 2.5
	Mélange de PCB
	Ethylbenzène
	Formaldéhyde
Très prioritaires	toluène, 1,4-
	dichlorobenzène,
	dichlorométhane,
	cadmium,
	décabromodiphényle éther,
	xylènes (o/m/p),
	acétaldéhyde,
	isoprène,
	chlore,
	cuiivre,
	nickel,
	plomb,
	furfural,
	manganèse,
	tétrachloroéthylène,
	chlorométhane

Les analyses réalisées par le LaSIE nous ont indiqué la présence d'un certain nombre de polluants, dans le tableau 29, nous présentons, les polluants ainsi que les concentrations moyennes pour chaque période :

Tableau 29. Concentrations moyennes air Tour Elithis

Polluant	HIVER	MI-SAISON	ETE	HIVER	MI-SAISON	ETE
	4 ^{ème}			9 ^{ème}		
2-carène	10.3	13.4	34.7	7.3	8.2	20.1
3-carène	6.8	14.1	58.6	10.8	8.1	36.3
Chlorobenzène	1.6	2.1	0.9	2.9	1.9	0.0
1,2,4-triméthylbenzène	3.8	11.3	1.8	3.5	11.7	0.3
1,4-dichlorobenzène	0.3	2.5	0.6	0.5	2.6	0.0
Acétaldéhyde	2.5	13.1	19.8	0.4	13.4	16.9
Ethylbenzène	1.7	14.2	21.3	1.4	13.4	12.8
Formaldéhyde	3.0	5.8	26.0	3.2	6.0	23.6
Styrène	1.6	2.7	6.9	1.3	2.3	3.7
Tétrachloréthane	1.4	4.4	0.0	2.7	2.5	0.0
Toluène	3.2	17.5	30.8	2.0	16.0	22.9
2-butoxyéthanol	5.2	18.0	0.4	4.3	19.3	0.0
Alpha-pinène	16.9	35.3	65.2	9.9	29.3	36.0
Benzène	0.7	2.4	3.0	0.9	3.3	6.0
Xylènes	4.7	13.6	26.9	2.3	15.0	18.0
Methanamide	0.3	1.3	9.3	0.3	1.5	7.5
Acroléine	0.1	5.6	18.5	0.3	6.7	12.7
Chloroforme	2.3	15.5	78.9	7.1	16.8	72.0
Furfural	0.2	0.6	1.8	0.2	0.6	0.6
Trichloroéthène	3.5	4.8	2.4	3.5	5.2	0.1
Chlorine	0.7	9.9	18.4	0.8	11.4	15.0
Ethanol	0.8	15.7	257.6	1.6	18.3	37.9
Methyl chloride	0.0	0.2	10.2	0.0	0.1	4.9
Propanal	1.7	6.5	17.9	1.0	7.6	26.3
R-limonène	9.6	20.0	102.4	5.9	13.8	25.4
1-methoxy-2-propanol	0.5	6.3	8.0	1.3	7.1	3.3
Ammonia	0.1	7.5	308.8	0.3	7.0	61.0
Hexanal	2.5	16.4	18.5	3.2	16.3	11.1
Naphtalène	2.5	5.2	0.1	2.4	4.6	0.0
Dioxyde d'azote	0.4	11.2	33.6	1.1	14.2	27.9

Nous pouvons observer une variation des concentrations en fonction de la saison pour la plupart des polluants. Des différences sont aussi observées entre les concentrations des deux étages. En prenant la liste des polluants définie

par l'OQAI, tableau 28 et les polluants observés dans nos mesures, seulement 9 polluants se trouvent dans l'air intérieur du bâtiment. Le tableau 30, présente ces polluants.

Tableau 30. Concentrations moyennes des polluants (OQAI) dans l'air de la Tour Elithis

Polluant	HIVER	MI-SAISON	ETE	HIVER	MI-SAISON	ETE
	4 ^{ème}			9 ^{ème}		
1,4-dichlorobenzène	0.3	2.5	0.6	0.5	2.6	0.0
Acétaldéhyde	2.5	13.1	19.8	0.4	13.4	16.9
Ethylbenzène	1.7	14.2	21.3	1.4	13.4	12.8
Formaldéhyde	3.0	5.8	26.0	3.2	6.0	23.6
Toluène	3.2	17.5	30.8	2.0	16.0	22.9
Benzène	0.7	2.4	3.0	0.9	3.3	6.0
Xylènes	4.7	13.6	26.9	2.3	15.0	18.0
Naphtalène	2.5	5.2	0.1	2.4	4.6	0.0
Dioxyde d'azote	0.4	11.2	33.6	1.1	14.2	27.9

De manière générale, nous pouvons observer une évolution des concentrations qui se fait en fonction de la saison, sauf pour le 1,4-dichlorobenzène et le Naphtalène. Les concentrations sont aussi plus importantes au 4^{ème} étage mais peut être dû à une présence de matériaux plus conséquent (cloisonnement). Une concentration importante ne veut pas dire que la qualité de l'air est mauvaise. Les valeurs guides permettent de définir le ou les polluants sur lesquels il peut y avoir un risque pour la santé. La figure 123, montre les concentrations moyennes par rapport aux valeurs guides définies par l'ANSES :

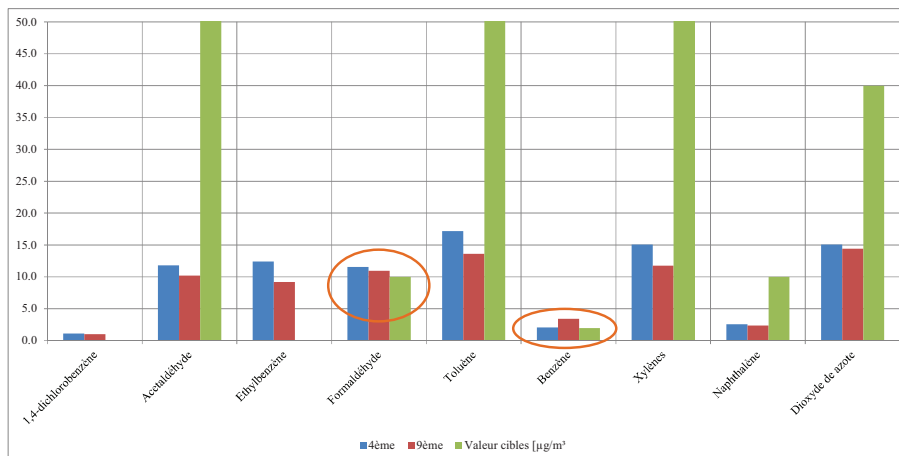


Figure 123. Concentrations moyennes 4^{ème}/9^{ème} étage et valeurs cibles

Les concentrations de deux polluants sont très proches des valeurs guides actuels, c'est le cas du formaldéhyde, et du benzène. Pour le benzène, la principale source est l'air extérieur, nous pouvons observer des valeurs élevées mais qui restent proches des valeurs limites. Pour le formaldéhyde les valeurs sont légèrement supérieures à la valeur guide (10 µg/m³). Nous avons observé dans le tableau 30, une évolution de la concentration de formaldéhyde très importante avec la saison:

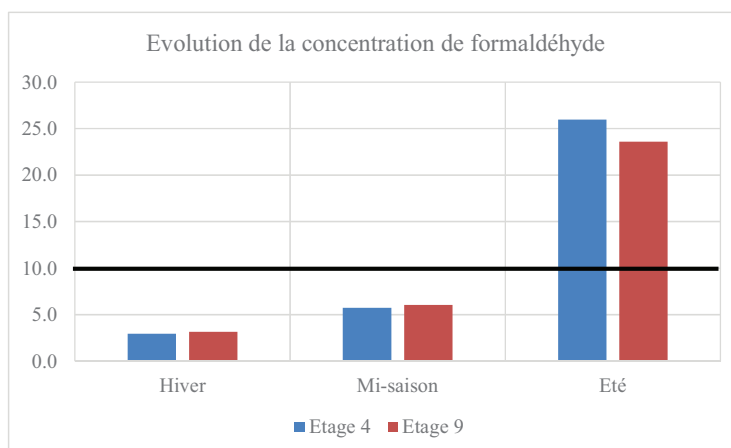


Figure 124. Évolution de la concentration de formaldéhyde

Entre l'hiver et l'été, nous pouvons observer de fortes disparités, qui peuvent influencer la QAI. L'été, les valeurs observées dépassent la valeur guide tandis que pendant toutes les autres saisons, les concentrations sont très en dessous. Nous pouvons parler de qualité de l'air saisonnière.

Le formaldéhyde est très volatile et avec les changements de température, sa concentration peut varier fortement. Des expériences menées ont démontré qu'une augmentation de la température de 10°C peut augmenter la concentration du formaldéhyde de 1.9 à 3.5 fois (Srinandini Parthasarathy, 2010). Dans notre cas, elle est de 8 fois plus importante. Nous sommes passés d'une valeur de 3 µg/m³ à 26 µg/m³.

4.3.1 Synthèse

Nous avons observé que les valeurs sont assez proches entre les étages, certainement plus élevées au 4^{ème} du fait d'une présence de matériaux plus importante. Le formaldéhyde apparaît dans chaque résultat et en fonction de la semaine sa concentration évolue. Nous avons observé que seulement deux polluants ont dépassé les valeurs guides, le formaldéhyde et le benzène. Le cas du formaldéhyde est complexe puisque sa concentration évolue fortement avec les températures.

4.4 Résultats ASPA – Émissions des matériaux

L'objectif de cette partie était de pouvoir identifier les sources d'émission. Ces analyses ont été réalisées par l'ASPA (Association pour la Surveillance et l'étude de la Pollution Atmosphérique en Alsace), grâce à la Cellule FLEC®, il a été possible de faire une analyse assez précise des matériaux et de pouvoir le corrélérer avec les mesures. Les résultats sont consignés dans un rapport publié par l'ASPA (ASPA, 2013). Les matériaux qui ont été analysés sont présentes dans la figure 125 :

Onze matériaux se trouvant au niveau du 4^{ème} étage de la tour Elithis ont été ciblés pour caractériser leurs émissions.

matériaux	zones instrumentées
1. Sol PVC collé (petite salle de réunion)	Bureau n°12
2. Cloisonnement modulable en plastique entre bureaux	Bureau n°15.
3. Plafond en plaques de plâtre	Bureau n°15.
4. Placard en métal peint	Bureau n°15.
5. Mur en béton peint sur le noyau central	zone près des serveurs
6. Portes intérieures (un type)	Bureau n°17
7. Portes intérieures (autre type)	Zone de stockage
8. Panneaux bois (coffrage entrée d'air)	Bureau n°9.
9. Bureaux et blocs à roulettes (en panneau à particules de bois plastifiés)	Bureau n°9.
10. Banc d'accueil en bois lamellé collé	Bureau n°1 accueil
11. Chaise en mousse	

Figure 125. Matériaux analysés – ASPA

Pendant toute la période d'analyse, 3 jours environ, la température à l'intérieur des locaux était de l'ordre de 25°C et une humidité de 47%. Ce qui est intéressant dans cette démarche est la relation avec le protocole d'analyse de matériaux de l'AFSSET (AFSSET, 2009), la température et humidité dans la chambre doit être de 23°C± 2°C et 50%±5% d'humidité relative. Les conditions d'analyse étaient presque identiques. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 31. Émissions des aldéhydes par les matériaux

matériaux / émissions en µg/m ² /h	Formaldéhyde	Acétaldéhyde	Propionaldéhyde	Butyraldéhyde	Benzaldéhyde	Isovaléraldéhyde	Valéraldéhyde
1. Sol PVC collé (n°12)	11,9	17,5	2,4	2,4	6,0	6,0	5,4
2. Cloisonnement modulable en plastique entre bureaux (n°15)	2,4	14,1	2,4	2,4	6,0	6,0	2,4
3. Plafond en plaques de plâtre (n°15)	24,6	23,3	2,5	2,6	6,2	6,2	4,1
4. Placard en métal peint (n°15)	2,1	14,2	2,4	2,4	5,9	5,9	2,4
5. Mur en béton peint sur le noyau central	19,3	22,8	2,6	3,1	7,0	6,6	4,0
6. Portes intérieures (n°17)	2,4	11,9	2,0	2,0	4,9	4,9	2,0
7. Panneaux bois	3,5	13,8	2,6	2,6	6,4	6,4	2,6
8. Bureaux et blocs à roulettes (en panneau à particules de bois plastifiés)	2,7	13,0	2,4	2,4	5,9	5,9	2,4
9. Banc d'accueil en bois lamellé collé (n°1)	19,2	15,4	2,3	2,3	5,8	5,8	2,3
MOYENNE	9,8	16,2	2,4	2,5	6,0	6,0	3,1

Nous pouvons observer que l'émission la plus forte est due au formaldéhyde et l'acétaldéhyde. Aux niveaux des sources d'émission, c'est le sol en PVC, le plafond et le mur en béton, qui contribuent le plus fortement. Les analyses qui ont été faites avec des prélèvements passifs (Radiello®), ont permis de corréler les émissions de matériaux obtenues avec des concentrations mesurées dans l'air. Le tableau 32 présente les concentrations moyennes de formaldéhyde mesurées pendant 2 heures :

Tableau 32. Concentration moyennes dans l'air

Concentration moyenne [µg/m ³]	
Formaldéhyde	13.85
Acétaldéhyde	11.25
Propionaldéhyde	1.2
Butyraldéhyde	1.85
Benzaldéhyde	2.45
Isovaléraldéhyde	2.55
Valéraldéhyde	1.55

Nous pouvons observer la relation entre les sources d'émission et les concentrations dans l'air. Le formaldéhyde et l'acétaldéhyde ont les concentrations les plus fortes. En ce qui concerne les autres COV, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 33 :

Tableau 33. Emission des COV dans les matériaux [µg/m² h]

	n-undécane	n-décane	benzène	toluène	éthylbenzène	m- + p-xylène	o-xylène	styrène	1,2,4-triméthylbenzène	naphtalène
1. Sol PVC collé	2,8	0,3	1,3	1,2	0,3	0,8	0,2	0,0	0,1	0,1
2. Cloisonnement modulable en plastique entre bureaux	0,0	0,0	1,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0
3. Plafond en plaques de plâtre	0,5	0,3	1,4	1,4	0,8	2,3	0,5	0,1	0,3	0,3
4. Placard en métal peint	0,1	0,0	0,9	0,6	0,2	0,6	0,2	0,0	0,1	0,1
5. Mur en béton peint sur le noyau central	0,3	0,1	0,9	0,4	0,5	1,2	0,3	0,1	0,2	0,2
6. Portes intérieures	0,1	0,0	1,9	0,5	0,2	0,7	0,2	0,0	0,1	0,1
7. Panneaux bois	0,1	0,0	1,3	0,3	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
8. Bureaux et blocs à roulettes (en panneau à particules de bois plastifiés)	0,1	0,0	0,6	0,3	0,1	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0
9. Banc d'accueil en bois lamellé collé	0,0	0,0	1,0	0,2	0,1	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0
MOYENNE	0,4	0,1	1,2	0,6	0,3	0,8	0,2	0,0	0,1	0,1

	1-méthoxy-2-propanol	1-méthoxy-2-propyl acétate	2-butoxyéthyl acétate	2-butoxyéthanol	trichloroéthylène	tétrachloroéthylène	1,4-dichlorobenzène	alpha pinène	limonène
1. Sol PVC collé	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	2,2	0,4
2. Cloisonnement modulable en plastique entre bureaux	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,2	0,0
3. Plafond en plaques de plâtre	0,8	0,4	0,0	0,4	0,0	3,8	0,0	4,2	0,8
4. Placard en métal peint	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,2	0,0
5. Mur en béton peint sur le noyau central	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	4,2	0,0	3,3	0,4
6. Portes intérieures	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	0,0	0,3	0,0
7. Panneaux bois	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,3	0,0
8. Bureaux et blocs à roulettes (en panneau à particules de bois plastifiés)	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,2	0,0
9. Banc d'accueil en bois lamellé collé	1,8	0,3	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,5	0,0
MOYENNE	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0	4,6	0,0	1,3	0,2

Au niveau des autres COV, l'émission la plus importante a été observée pour le tétrachloroéthylène. En deuxième nous avons le benzène et l'alpha pinène, et en troisième le toluène et le xylène. Pour le tétrachloroéthylène, ce sont les portes intérieures qui contribuent le plus. Pour les autres polluants, le sol, plafond et portes contribuent de manière importante, notamment pour le benzène. Dans les analyses faites par le LaSIE nous avons observé la présence du benzène, les sources d'émissions sont probablement celles exposées ici. Les prélèvements d'air réalisés par l'ASPA ont permis de vérifier la présence de ces polluants, le tableau 34, montre les résultats avec des tubes Radiello :

Tableau 34. Concentration moyenne des COV dans l'air

n-décane et isomères	0,4
n-undécane et isomères	0,8
benzène	0,5
toluène	1,7
éthylbenzène	1,8
m- + p-xylène	4,3
o-xylène	0,9
styrène	0,2
1,2,4-triméthyl-benzène	0,5
naphthalène	0,1
1-méthoxy-2-propanol	1,2
1-méthoxy-2-propyl acétate	1,1
2-butoxyéthyl acétate	0,3
2-butoxyéthanol	0,9
trichloroéthylène	0,1
tétrachloroéthylène	0,3
1,4-dichlorobenzène	0,1
alpha-pinène	11,6
limonène	1,8

Ces résultats permettent de confirmer la présence de l'alpha pinène dans l'air. Les restes des polluants probablement sont bien dilués par la ventilation. Pour le tétrachloroéthylène, nous n'avons pas trouvé de corrélation, la concentration est très faible environ 0.3 µg/m³.

4.5 Conclusion

Avec le travail réalisé avec Atmosf'air nous avons observé le transfert qui peut avoir lieu de la pollution extérieure vers l'air intérieur du bâtiment. Nous n'avons pas pu déterminer une corrélation pour les NO_x ni l'Ozone. Seules les Particules Fines ont montré une évolution en fonction de la période, un ratio de transfert a été obtenu.

Nous avons identifié les polluants les plus présents dans l'air et qui peuvent nous servir comme traceurs de la QAI pour notre travail d'analyse. Nous avons aussi observé l'influence des saisons sur les concentrations puisqu'une évolution a été observée avec les températures plus élevées. Par rapport aux valeurs guides, la concentration de formaldéhyde est parfois plus importante. Nous nous intéressons donc à ce polluant.

Ce travail de suivi de la QAI de la Tour Elithis, nous a permis d'identifier les polluants qui composent l'air du 4^{ème} étage et 9^{ème} étage. Les concentrations sont assez proches entre les deux niveaux, avec des valeurs légèrement plus importantes au 4^{ème} étage, peut être dues à un cloisonnement plus important.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le modèle numérique de la Tour Elithis qui a été développé. Avec les résultats obtenus dans ce suivi, nous allons présenter les méthodes de modélisation de la qualité de l'air et du confort que nous avons défini.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats du suivi énergétique, du confort thermique ressenti et de la qualité de l'air. Au niveau énergétique, le bâtiment Tour Elithis affiche un bilan intéressant, nous avons observé que pour améliorer le confort thermique ressenti la demande énergétique peut augmenter considérablement. Le suivi du confort thermique ressenti a donné un résultat qui n'est pas aussi bon que nous aurions pu le souhaiter. Les taux de satisfaction sont assez faibles, démontrant ainsi que l'efficacité énergétique n'est pas synonyme de confort. Dans une dernière partie, nous avons présenté les résultats du suivi de la qualité de l'air intérieur. Nous avons observé les transferts qui ont lieu entre l'air extérieur et intérieur, nous avons obtenu des ratios de transfert intéressant pour les particules fines, qui vont nous aider pour la modélisation de la QAI. De manière générale, la qualité de l'air du bâtiment est assez bonne, seuls deux polluants montrent des concentrations légèrement élevées. Nous avons vu que pour le cas du formaldéhyde, sa concentration évolue fortement en fonction de saisons, la QAI peut être donc, établit en fonction de la période.

Ces travaux nous ont permis de faire un lien précis entre efficacité énergétique, confort et QAI, les trois critères qui définissent la QEI. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le modèle numérique de la Tour Elithis et nous verrons comment les résultats obtenus dans ce chapitre vont nous permettre de valider notre modèle numérique.

CHAPITRE IV.

PRESENTATION DU MODÈLE NUMERIQUE DU BÂTIMENT POUR L'ANALYSE DE LA QEI

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la Tour Elithis, nous avons pu constater ses bonnes performances énergétiques en revanche, en termes de confort et qualité de l'air perçu, les résultats ne sont pas totalement satisfaisants. Nous n'avons pas observé une relation entre efficacité énergétique, confort et qualité de l'air.

Actuellement, il n'existe que peu de sites qui permettent de tester différentes solutions techniques comme, la maison MARIA du CSTB, BestLAB Chez EDF à Renardières, CLIMATRON et TIPEE sur le site Atlantech à La Rochelle, mais ils ne permettent pas d'étudier un bâtiment de bureaux dans des conditions de fonctionnement réels. Pour cette raison nous nous intéressons à la Tour Elithis.

Bien que la Tour Elithis ait été modélisée avec un autre code de calcul, pour notre travail de recherche celui-ci s'est avéré insuffisant et nous avons retenu energyplus. De plus, nous avons vu dans le chapitre III, des différences entre la phase conception et la réalité. Notre objectif est de construire un modèle numérique proche des données de demande énergétiques réelles du bâtiment. Dans ce chapitre nous présentons le modèle numérique du bâtiment que nous avons construit ainsi que les résultats obtenus. Nous comparerons les résultats obtenus avec les informations fournies par la GTC du bâtiment.

1. INTRODUCTION DE L'OUTIL – ENERGYPLUS

Energy +, a été développé par le DOE (Département Of Energy) des Etats-Unis et le laboratoire de Berkeley. La première version stable date de 2001, actuellement nous sommes à la version 8.1. Energy Plus est un outil de simulation énergétique des bâtiments que les ingénieurs, architectes et chercheurs utilisent pour estimer et optimiser la consommation d'énergie et d'eau des bâtiments. Le travail de modélisation a été réalisé avec ce moteur de calcul car il est « open source » et il intègre toutes les recherches réalisées pendant les 40 dernières années aux Etats-Unis et dans le monde entier. La validation de cet outil a fait l'objet d'une publication réalisée par l'ASHRAE (ASHRAE, 2011). Energy+ est une boîte à outils constituée de modules organisés de la manière suivante (Figure 127) :



Figure 126. Energy plus

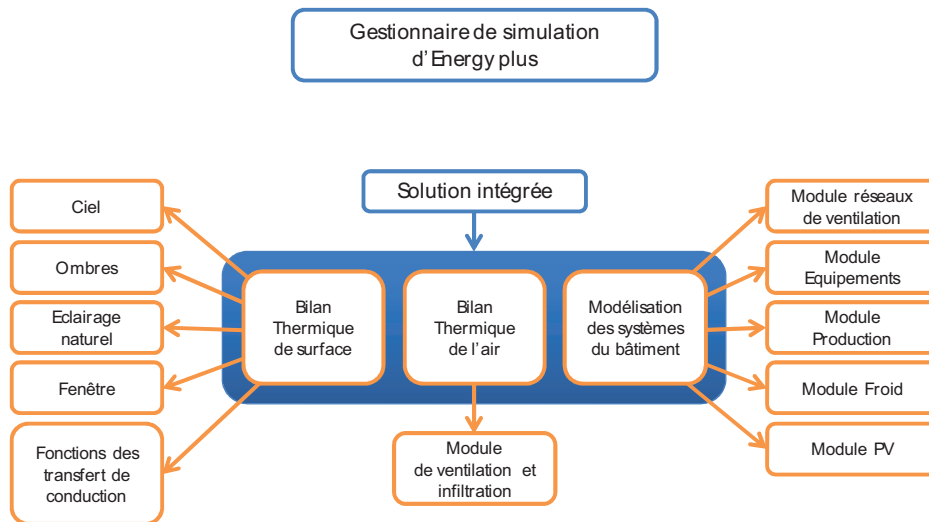


Figure 127. Schéma de fonctionnement d'EnergyPlus

Le noyau, en bleu, présente les principes fondamentaux de conservation de la masse et de l'énergie pour la modélisation. La programmation est faite sur la base du langage FORTRAN. EnergyPlus est un outil de modélisation intégrée, c'est-à-dire que le bâtiment, les systèmes et la production sont modélisés en même temps.

EnergyPlus est un outil de simulation de la charge thermique et d'analyse de l'énergie. Il est basé sur la description qui fait l'utilisateur du bâtiment à partir de la perspective de la constitution physique du bâtiment et des systèmes mécaniques et d'autres associés, EnergyPlus calcule le chauffage et le refroidissement, charges nécessaires pour maintenir les consignes de température et la consommation d'énergie des équipements. L'intégration simultanée de ces paramètres, fait que la simulation sur EnergyPlus soit effectuée comme le ferait le bâtiment réel. Les principales caractéristiques de ce moteur de calcul sont :

- Une simulation intégrée. La réponse fournie par le bâtiment est étroitement couplée avec les systèmes primaires et secondaires.
- Possibilité de définir le temps de simulation inférieure à une heure
- Les fichiers météo ainsi que l'outil sont basés sur des fichiers ASCII
- Le calcul simultané des effets de convection et rayonnement
- Les flux transitoires de chaleur à travers des éléments de construction tels que les murs, les toits, les planchers, etc. utilisent les fonctions de transfert de conduction
- La modélisation du transfert de la chaleur du sol se base sur les différences finies en trois dimensions et des techniques analytiques simplifiées
- Humidité et chaleur combinée est un modèle de transfert de masse qui tient compte de l'humidité d'adsorption / désorption soit comme une intégration couche par couche dans les fonctions de transfert de conduction ou en tant que modèle de la profondeur de pénétration de l'humidité effective (EMPD)
- Intégration des modèles de confort thermique, Fanger, KSU, Pierce, adaptatif

- Intégration du modèle de ciel anisotrope pour améliorer le calcul de l'énergie solaire diffus sur des surfaces inclinées
- Calculs des compositions des vitrages complexes ainsi que des protections solaires, tels que des stores contrôlables, de vitrages électrochromes
- Calcul de l'éclairement intérieur ainsi que du risque d'éblouissement

L'avantage le plus intéressant qui fait que soit l'outil le plus téléchargé au monde, plus de 85000 copies du logiciel ont été téléchargées depuis Avril 2001, c'est sa gratuité et son code est open-source.

1.1 Interface

Pour la construction des géométries différentes interfaces existent (DOE, 2013). Nous avons utilisé OpenStudio un Plugin développé pour SketchUp. Ce plugin, gratuit, permet également de lancer des simulations et de visualiser les résultats sans quitter le programme de dessin de SketchUp3D.

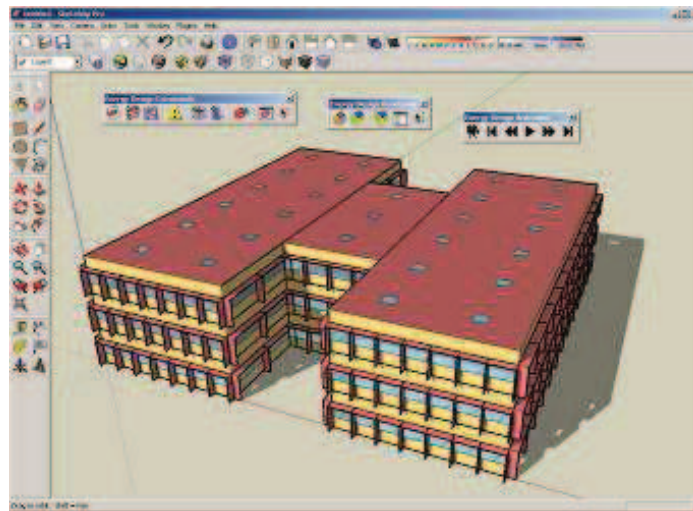


Figure 128. OpenStudio Plug-in (EnergyPlus Energy Simulation software)

1.2 Période d'analyse

Pour la simulation du bâtiment, nous avons défini deux semaines, une en hiver et une en été. Au début de notre travail nous avons défini une simulation du bâtiment sur une année entière mais nous nous sommes aperçus que les informations fournies par le logiciel de gestion de la GTC étaient incomplètes. Nous n'avons pas pu récupérer la demande du bâtiment sur un mois en entier. Pour pouvoir comparer nos résultats nous n'avons pas disposé de suffisamment d'informations. Pour cette raison, nous avons défini deux semaines pour notre analyse.

Semaine d'hiver. Du 19 décembre au 23 décembre 2011

Semaine d'été. Du 18 Juin au 22 juin 2012

Les périodes ont été choisies en fonction des informations obtenues. Ce sont les seules semaines qui nous fournissaient une information détaillée et complète du comportement du bâtiment.

2. PRESENTATION DU MODELE

La modélisation s'est divisée en deux parties, la première la 3D, où le bâtiment avec tous ses détails extérieurs (quartier + protections solaires) et intérieurs (zones thermique) ont été définis. La deuxième concerna la caractérisation de l'enveloppe, les charges internes et les systèmes, ici, nous avons travaillé directement sur EnergyPlus.

2.1 Modèle 3D

2.1.1 Zonage thermique

Le bâtiment est composé de 10 étages, 9 étages courants (bureaux) et un étage technique comme la figure suivant la montre :

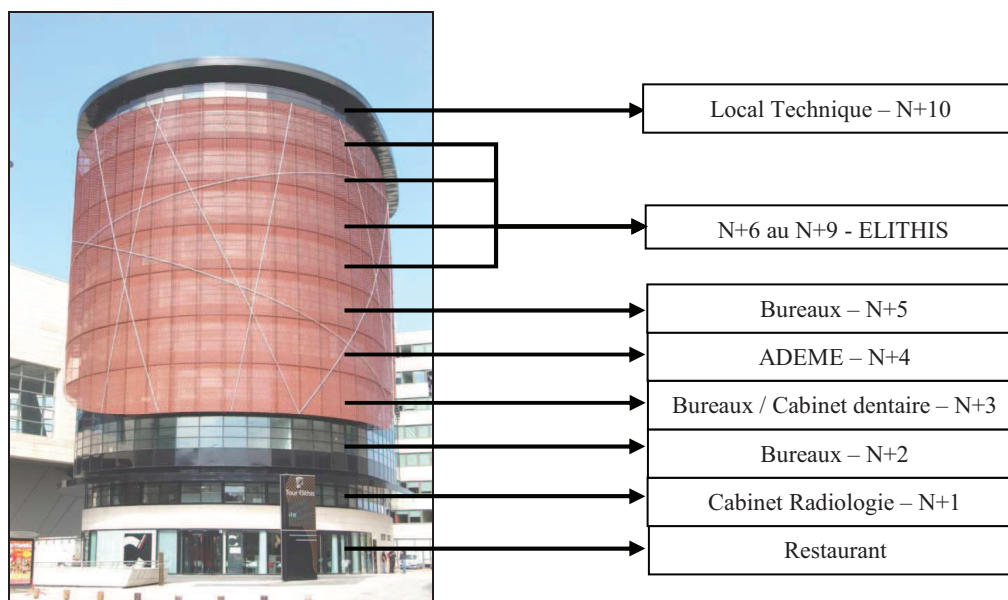


Figure 129. La Tour Elithis

Au sous-sol nous retrouvons un parking, des caves de stockage et la chaufferie. Les zones thermiques ont été définies suivant cette configuration, nous avons défini une zone thermique par étage, distribution open space, à l'exception du 4^{ème}. Cet étage se caractérise par une distribution plus classique et représentative d'un espace bureau, sa distribution est composée des bureaux fermés et des bureaux en open space (figure 130). Nous nous sommes concentrés dans la simulation de cet étage :

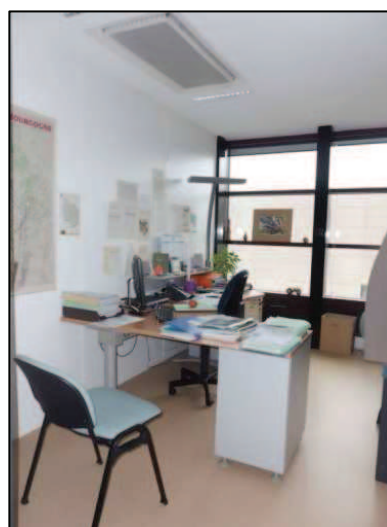


Figure 130. Distribution espaces Tour Elithis (a. Espace ouvert 4ème étage. b. Etage courant. c. Bureau cloisonné)

Le bâtiment a été divisé en 37 zones thermiques réparties de la manière suivante :

Tableau 35. Zones thermiques

1	Parking	9	N3	17	N4-Bur 7	25	N4-SDR 2	33	N6
2	Ascenseurs	10	N4-Accueil	18	N4-Bur 8	26	N4-Bur 13	34	N7
3	Escalier 1	11	N4-Bur 1	19	N4-Cafétéria	27	N4-Bur 14	35	N8
4	Escalier 2	12	N4-Bur 2	20	N4-SDR 1	28	N4-Archives	36	N9
5	Hall entrée	13	N4-Bur 3	21	N4-Bur 9	29	N4-Bur 15	37	N10
6	Restaurant	14	N4-Bur 4	22	N4-Bur 10	30	N4-Circulation		
7	N1	15	N4-Bur 5	23	N4-Bur 11	31	Plafond		
8	N2	16	N4-Bur 6	24	N4-Bur 12	32	N5		

Le quatrième étage a été donc, divisé en fonction de sa distribution. Dans le tableau 35, nous pouvons observer sa décomposition. Dans la Figure 131 nous présentons le zonage de cet étage :

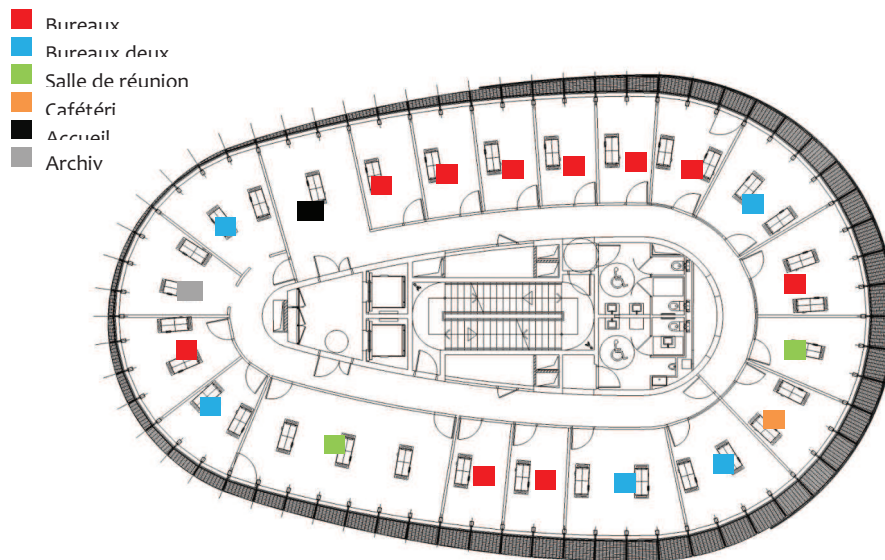


Figure 131. Zonage 4^{ème}

2.1.2 Quartier

La Tour Elithis est impactée par les ombres portées par l'auditorium, côté ouest et par le Palais de congrès, côté est. Pendant l'hiver, avec le soleil plus bas, le bâtiment reçoit moins d'apports solaires, impactant négativement la consommation de chauffage. En été et pendant la période estivale, le bâtiment est donc mieux protégé, le besoin en froid est, donc moins important. Nous avons créé des zones pour les représenter, on peut les distinguer par une couleur pourpre sur la figure 132.

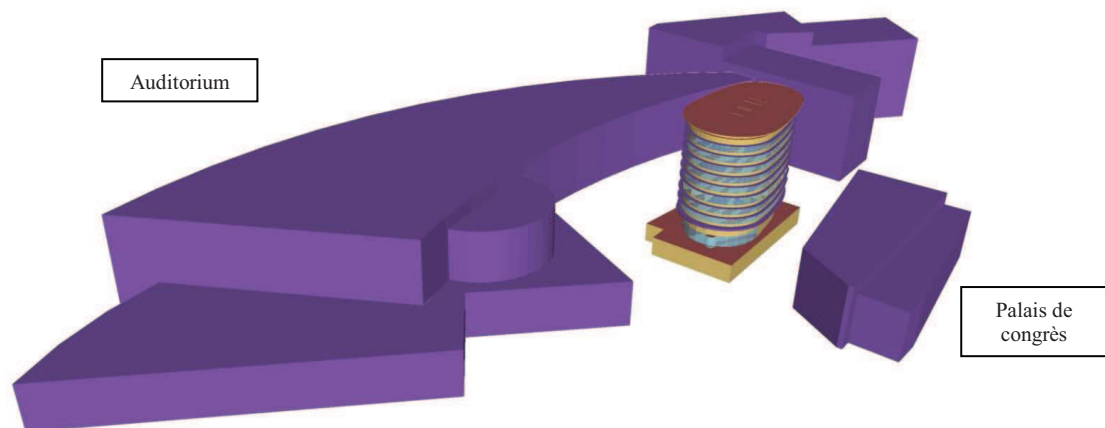


Figure 132. Quartier Tour Elithis

2.1.3 Le Bouclier thermique

Ce système original a été conçu avec deux objectifs, le premier pour protéger le bâtiment du soleil et le deuxième pour laisser passer le plus de lumière afin de limiter les apports solaires et mieux gérer le confort visuel, ce bouclier a été conçu en suivant la course du soleil et les ombres portées par les autres bâtiments (Est-Ouest) sur la surface extérieure du bâtiment. Pour cette raison, sa forme n'est pas symétrique du fait de la présence des bâtiments environnants.

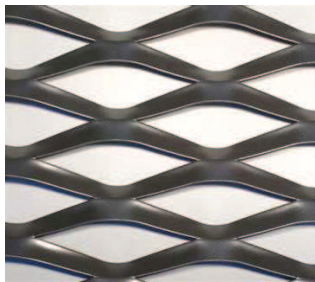


Figure 133. Maille Bouclier Thermique - Métal Déployé

De façon à modéliser au mieux ce bouclier, nous avons dessiné le bouclier comme une protection solaire extérieure classique caractérisée par son facteur de transparence. Le bouclier est divisé en 37 trames verticales de 1.60 m de large (largeur fenêtre). La forme arrondie est donnée par l'assemblage de formes droites, les lignes courbes n'existent pas.

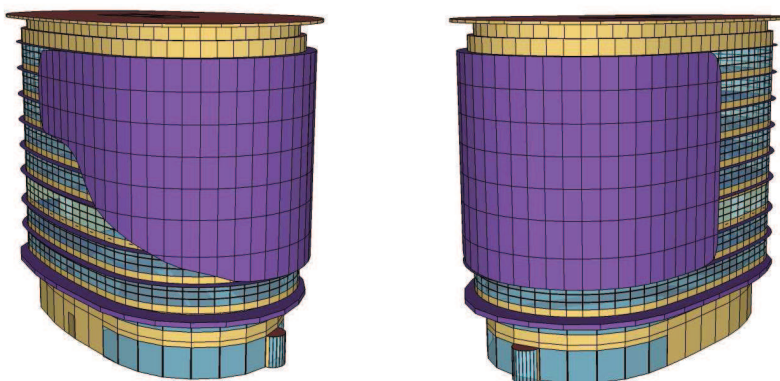


Figure 134. Trames verticales - Bouclier thermique

Ce travail de modélisation 3D a été réalisé en utilisant le plugin OpenStudio pour SketchUp. Dans cette première partie nous avons construit la forme du bâtiment, du bouclier et du quartier de manière assez précise. Nous pouvons observer dans la Figure 135 :

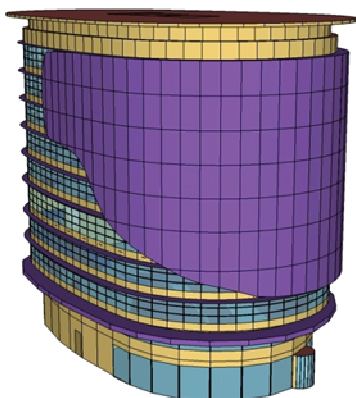


Figure 135. Tour Elithis Vs modèle 3D

2.2 Saisie du modèle sur EnergyPlus

2.2.1 Occupation

A partir de la GTC du bâtiment, nous avons pu obtenir les informations sur l'occupation du bâtiment. Un bâtiment de bureau se caractérise par l'utilisation des ordinateurs et des serveurs. Nous avons suivi la consommation des appareils bureautiques pour déterminer ainsi un scénario d'occupation. Voici le scénario :

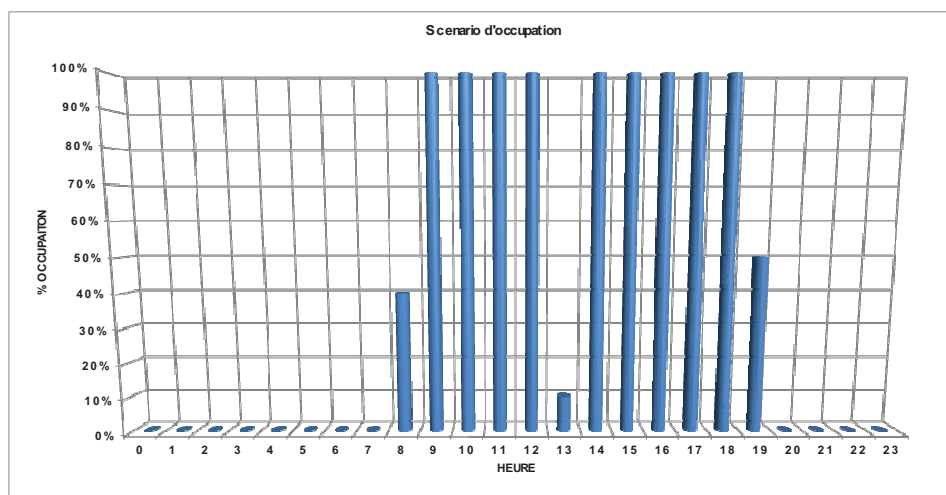


Figure 136. Scénario d'occupation du bâtiment

Entre 7h et 8h, on considère que l'étage est occupé à 40%, entre 8h et 12h à 100%, entre 12h et 14h à 10% , entre 14h et 18h à 100% et entre 18h et 19h à 50%. Ce scénario représente de manière générale une utilisation classique d'un bâtiment de bureaux. Pour le taux d'occupation, nous l'avons défini par étage. Dans le Tableau 36 nous présentons cette configuration :

Tableau 36. Taux d'occupation par étage

Étage	Occupation
N1	3
N2	0
N3	5
N4	18
N5	5
N6	28
N7	32
N8	32
N9	15

Nous nous intéressons au 4^{ème} étage, puisqu'il est plus représentatif d'un bâtiment de bureaux. Cet étage est composé des bureaux fermés et espaces ouverts. Pour cette raison, nous avons fait une répartition de l'occupation par bureaux. Le Tableau 37 présente cette configuration :

Tableau 37. Taux d'occupation étage 4

Bureaux	Occupation
01-02	1
08	1
09	1
10-11	2
12-13	2
17-18	1
19-20	2
21-22	1
23	1
24	1
25	1
26	1
27	1
28	1
29-30	1

Pour le calcul de la chaleur sensible et latente, nous avons pris une valeur de 126 W (ASHRAE, 2010). Cette valeur est donnée pour une personne qui réalise une activité bureautique et qui est assise. Cette chaleur est répartie en

fonction des conditions thermiques à l'intérieur du bureau, une part sensible et une part latente sont donc obtenues. Cela est déterminé par le logiciel. Nous avons pris cette hypothèse pour améliorer le calcul de l'apport thermique et hydrique. Pour le flux rayonné par les occupants, il est forfaitisé à 30% de la chaleur sensible.

2.2.2 Modélisation de l'éclairage

Le fonctionnement de l'éclairage du bâtiment dépend de la présence des occupants et de la luminosité. Pendant les heures de travail (7-19h), nous considérons une occupation constante (Tableau 37, Tableau 36). Pour la modélisation de l'éclairage nous avons simplement défini un control de la lumière (Daylighting control) dans chaque bureau et étage couplé avec l'occupation. La valeur que nous avons définie pour l'éclairage est de 200 lux. De cette manière, en fonction de la luminosité, l'éclairage est régulé de la même manière que dans le bâtiment, puissance d'éclairage de 2 W/m² a été aussi définie (valeur GTC).

L'éclairage contribue au bilan thermique de la pièce car il produit de la chaleur. Dans EnergyPlus cet apport est calculé de la manière suivante.

Équation 5

$$f_{\text{convected}} = 1.0 - (\text{Return Air Fraction} + \text{Fraction Radiant} + \text{Fraction Visible})$$

Pour déterminer l'apport calorifique de l'éclairage, plusieurs configurations existent (Figure 137), pour le cas du 4^{ème} étage (lampes nomades) nous avons pris « suspended » :

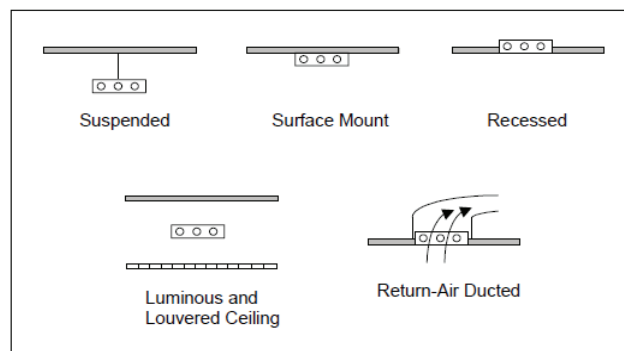


Figure 137. Types de luminaires

Les valeurs pour le calcul de l'apport calorifique sont les suivants :

Tableau 38. Coefficients pour le calcul de l'apport calorifique des luminaires

Description	Valeur
Return air fraction	0.0
Fraction radiant	0.42
Fraction visible	0.18

La fraction totale est de 0.4 ($F_{\text{convected}} = 1 - 0.6 = 0.4$). Cette valeur de 0.4 sera multiplié à la quantité à la puissance dégagée par le luminaire (max 2 W/m²). Pour la régulation de l'éclairage nous avons pris une valeur de 200 lux (valeur de référence mesurée par la sonde au plafond), c'est la valeur qui a été définie par défaut dans le bâtiment.

2.2.3 Modélisation des équipements bureautiques

L'architecture de la GTC a été établie pour pouvoir mesurer de manière indépendante, la consommation des appareils informatiques. La consommation est divisé en 3 zones, NE, SO et Serveur.

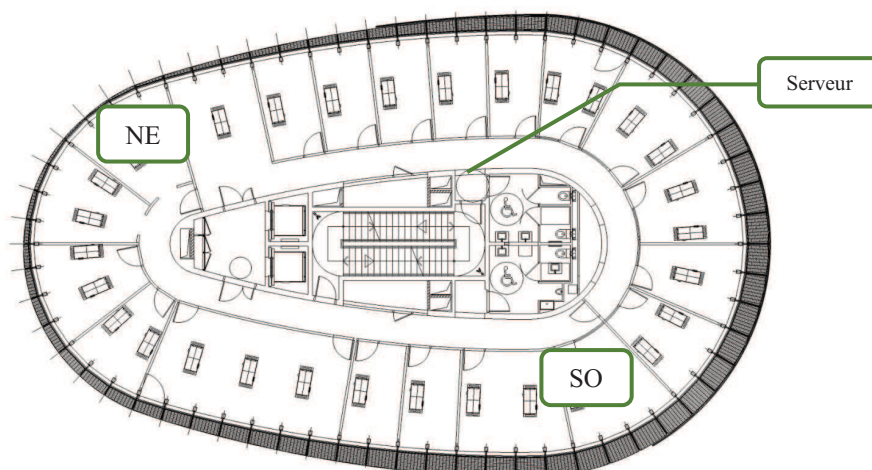


Figure 138. Zonage consommation postes informatiques

A partir de cela, nous avons déterminé une puissance moyenne. Nous avons construit un scénario d'utilisation pour décembre 2011 et Juin 2012. La répartition de la puissance pour la semaine d'hiver (19 au 23 décembre) est présentée dans la Figure 139 :

Puissances bureautiques - HIVER				
JOUR	DATE	NE [W/m²]	SO [W/m²]	Serveur [W/m²]
Lundi	19/12/2012	4.35	1.44	1.89
Mardi	20/12/2012	4.79	1.79	1.95
Mercredi	21/12/2012	5.10	1.19	1.98
Jeudi	22/12/2012	3.15	0.89	1.95
Vendredi	23/12/2012	0.38	0.20	1.95

Puissances bureautiques - ÉTÉ				
JOUR	DATE	NE [W/m²]	SO [W/m²]	Serveur [W/m²]
Lundi	18/06/2012	4.38	2.14	1.92
Mardi	19/06/2012	5.59	2.92	1.92
Mercredi	20/06/2012	4.69	0.95	1.92
Jeudi	21/06/2012	6.05	2.08	1.98
Vendredi	22/06/2012	4.76	1.67	2.11

Figure 139. Répartition des consommations pour la partie bureautique

Nous pouvons observer des différences entre les deux périodes, les puissances consommées sont légèrement plus importantes la semaine d'été. La consommation des serveurs est constante, la valeur moyenne est 1.9 W/m². A partir de ces valeurs, nous avons déterminé un ratio pour chaque jour. Cela nous a permis de définir un scénario d'utilisation. Dans le Tableau 39 nous présentons les valeurs :

Tableau 39. Répartition des puissances bureautiques

	Coefficients - Puissance bureautique - HIVER														
	NE					SO					SERVEUR				
	19/12/2012	20/12/2012	21/12/2012	22/12/2012	23/12/2012	19/12/2012	20/12/2012	21/12/2012	22/12/2012	23/12/2012	19/12/2012	20/12/2012	21/12/2012	22/12/2012	23/12/2012
00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
07:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
08:00:00	0.174	0.191	0.204	0.126	0.015	0.058	0.071	0.048	0.036	0.008	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
09:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
10:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
11:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
12:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
13:00:00	0.043	0.048	0.051	0.031	0.004	0.014	0.018	0.012	0.009	0.002	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
14:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
15:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
16:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
17:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
18:00:00	0.435	0.479	0.510	0.315	0.038	0.144	0.179	0.119	0.089	0.020	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
19:00:00	0.217	0.239	0.255	0.157	0.019	0.072	0.089	0.060	0.045	0.010	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
20:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
21:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
22:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081
23:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.079	0.081	0.082	0.081	0.081

Coefficients - Puissance bureautique - ÉTÉ															
	NE					SO					SERVEUR				
	18/06/2012	19/06/2012	20/06/2012	21/06/2012	22/06/2012	18/06/2012	19/06/2012	20/06/2012	21/06/2012	22/06/2012	18/06/2012	19/06/2012	20/06/2012	21/06/2012	22/06/2012
00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
07:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
08:00:00	0.146	0.186	0.156	0.202	0.159	0.071	0.097	0.032	0.069	0.056	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
09:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
10:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
11:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
12:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
13:00:00	0.110	0.140	0.117	0.151	0.119	0.054	0.073	0.024	0.052	0.042	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
14:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
15:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
16:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
17:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
18:00:00	0.438	0.559	0.469	0.605	0.476	0.214	0.292	0.095	0.208	0.167	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
19:00:00	0.183	0.233	0.195	0.252	0.198	0.089	0.122	0.040	0.087	0.069	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
20:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
21:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
22:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088
23:00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088

L'apport thermique des postes informatiques, est défini par les puissances présentées dans le tableau précédent. La chaleur dégagée par les machines se retrouve dans l'air.

2.2.4 Modélisation des infiltrations

Pour la modélisation de l'infiltration, il est important de connaître les valeurs de perméabilité à l'air des parois du bâtiment. Pour déterminer la valeur des débits d'infiltration, une des méthodes consiste à simuler les infiltrations comme des orifices dans les parois (Allard, et al., 1990). Cette méthode est très complexe et pour avoir un résultat cohérent, beaucoup d'hypothèses doivent être faites. Nous avons utilisé deux méthodes pour estimer la valeur d'infiltration dans le bâtiment.

- La porte soufflante, largement utilisée pour déterminer les débits d'infiltration totale dans un bâtiment.
- La méthode de décroissance de la concentration de CO₂ (Roulet & Foradini, 2002)

2.2.4.1 Résultats du test d'étanchéité

Un test d'étanchéité réalisé en octobre 2012 a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau 40. Valeur du débit d'infiltration obtenu par le test d'infiltration pour $\Delta P = 4$ Pa

Test infiltration		
Débit	880.0	m ³ /h
Volume	1360.8	m ³
Taux	0.65	vol/h

Des incertitudes d'environ 13% ont été obtenues pendant les tests d'étanchéité. .

2.2.4.2 Résultats obtenus par la méthode de décroissance de la concentration en CO₂

Cette méthode se base sur la décroissance de la concentration de CO₂. Ce gaz, dans les bâtiments, est produit principalement par la respiration. Avec l'arrêt de la ventilation, notamment en période d'inoccupation, la diminution de la concentration de CO₂ dépendra du débit d'infiltration. Une concentration normalisée, C_N , peut être exprimée comme une fonction de la concentration initiale, $C(0)$ et de la concentration finale $C(t)$ et de la concentration extérieure C_o .

Équation 6

$$C_N = \ln \frac{C(t) - C_o}{C(0) - C_o}$$

A partir de cette équation, une valeur normalisée peut être obtenue à chaque instant. A partir de la représentation graphique de ces valeurs une régression linéaire est obtenue, la pente représente donc, le taux de renouvellement d'air.

Nous avons fait donc, des mesures de CO₂ pendant une semaine, du 6 février au 10 février 2013, à trois endroits de l'étage (Figure 140), Les résultats sont montrés dans le Tableau 41.

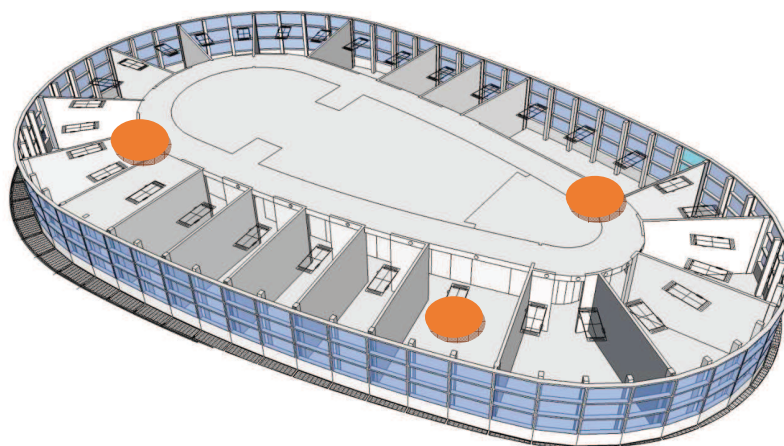


Figure 140. Mesures de CO₂ – 4^{ème} étage

Tableau 41. Concentration de CO₂ moyenne - Semaine Décembre 2011

Heure	Indice	Ct [ppm]	C max (Ci)	C min	Cn	LN
19:00:00	12.00	1364	1364	479		
20:00:00	11.00	1228	1364	479	0.859	-0.15
21:00:00	10.00	968	1364	479	0.589	-0.53
22:00:00	9.00	806	1364	479	0.421	-0.86
23:00:00	8.00	692	1364	479	0.303	-1.19
00:00:00	7.00	633	1364	479	0.242	-1.42
01:00:00	6.00	588	1364	479	0.195	-1.63
02:00:00	5.00	550	1364	479	0.156	-1.86
03:00:00	4.00	527	1364	479	0.132	-2.03
04:00:00	3.00	509	1364	479	0.113	-2.18
05:00:00	2.00	493	1364	479	0.096	-2.34
06:00:00	1.00	479	1364	479		

Nous avons représenté graphiquement les valeurs de C_N en fonction du temps, Figure 141 :

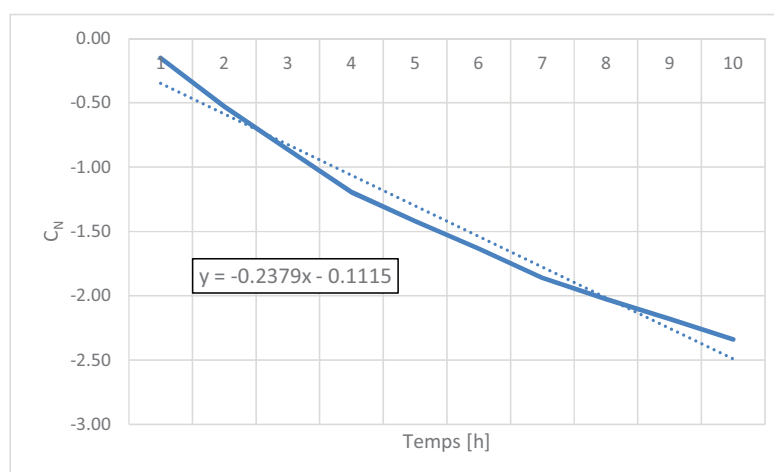


Figure 141. Concentration normalisée C_N

Nous avons obtenu une régression linéaire et son équation, le terme qui accompagne le « x » définit la pente de la courbe qui représente le taux de renouvellement d'air. Nous avons obtenu une valeur de 0,23 vol/h.

En comparant les valeurs, nous observons des différences. Pour le test nous avons obtenu une valeur de 0,65 vol/h contre 0,23 vol/h avec la méthode du CO₂. Les différences peuvent s'expliquer par les conditions météorologiques. Pendant le test d'étanchéité des valeurs de vitesse de vent élevées ont été observées (environ 15m/s) avec des fortes fluctuations. Pour cette raison nous avons calculé une valeur moyenne entre ces deux valeurs, 0,44 vol/h, cette dernière est la valeur que nous avons prise pour la modélisation des infiltrations.

Pour la modélisation nous avons choisi un scénario de fonctionnement constant mais déterminé par la météo. l'équation qui détermine le débit d'infiltration est la suivante:

Équation 7

$$Infiltration = (I_{design})(F_{schedule})[A + B|(T_{zone} - T_{odb})| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)]$$

Les débits d'infiltrations sont déterminés, à partir de la valeur d'infiltration, I_{design} , du scénario, $F_{schedule}$, de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ($T_{zone} - T_{odb}$) et des coefficients A, B et C. Ces derniers sont définis par le modèle DOE-2 (ASHRAE, 2013). L'infiltration dépendra des conditions climatiques et des températures intérieures, ce modèle donne une bonne approche des infiltrations.

2.2.5 Modélisation de la ventilation

Le fonctionnement de la ventilation entre le 19 et 23 décembre 2011, période de référence pour la semaine d'hiver, varie en fonction de la journée. La figure 142 montre le scénario de fonctionnement qui a été défini à l'époque, nous l'avons repris à l'identique :

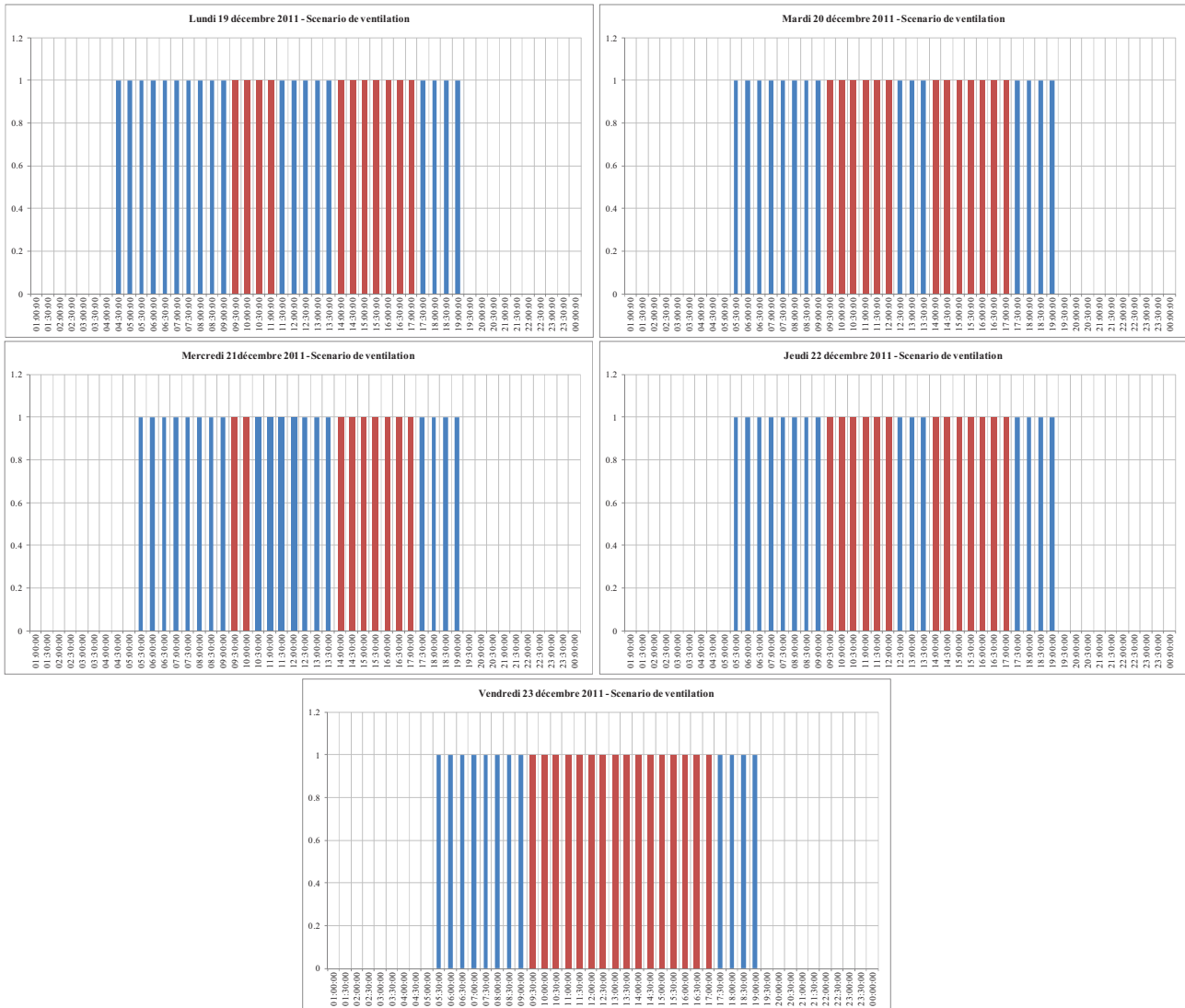


Figure 142. Scénario de ventilation – Semaine hiver

Les barres rouges montrent le scénario de fonctionnement du recyclage. Nous pouvons observer quelques différences, en particulier sur le mode d'utilisation. Comme nous l'avons montré lors de l'enquête sur le confort thermique, le taux de satisfaction au regard des températures était faible. Pour améliorer le confort et pour ne pas impacter la consommation énergétique, un fonctionnement en recyclage a été adopté pendant l'hiver (Figure 142). Malgré que ce mode de fonctionnement ne soit pas conseillé pendant les heures d'occupation d'un bâtiment il a été utilisé pour des soucis de confort et de consommation. Il permet certes, de chauffer le bâtiment plus rapidement en optimisant la consommation énergétique mais la qualité de l'air peut être pénalisée. Le taux de satisfaction au regard de la qualité de l'air perçu peut être lié à ce mode de fonctionnement.

Pour le mode estival (18 – 22 juin 2012), le scénario de ventilation est différent (Figure 143). La ventilation fonctionne entre 7h et 19h en permanence. Les conditions thermiques sont différentes ainsi que les besoins, d'où la différence par rapport au mode hiver.

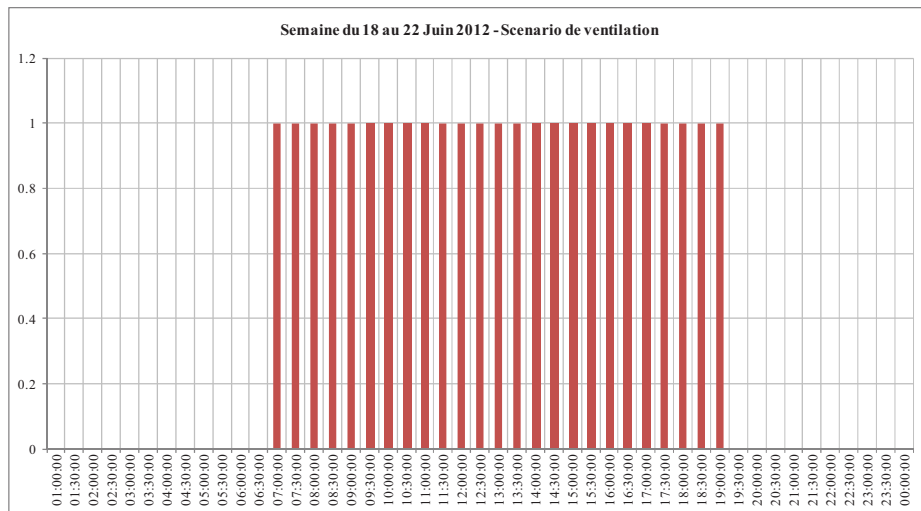


Figure 143. Scénario de fonctionnement de la ventilation – Semaine du 18 au 22 juin

En hiver, le dispositif se compose d'un ventilateur pour le soufflage et d'un second pour l'extraction et d'un échangeur de chaleur. Vu la complexité de l'installation nous avons simplifié la saisie du système de ventilation. Le réseau a été défini par une perte de charge équivalente de 250 Pa (Figure 144).

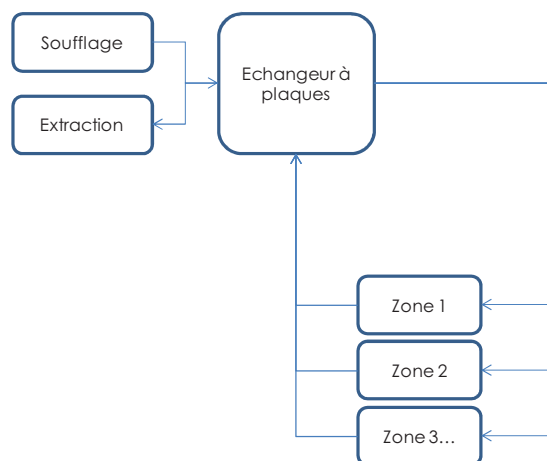


Figure 144. Schéma de la ventilation hivernale - double flux avec récupération

Pour la ventilation d'été, nous avons modélisé un système de ventilation double flux sans échangeur, la Figure 145 montre le schéma de la ventilation.

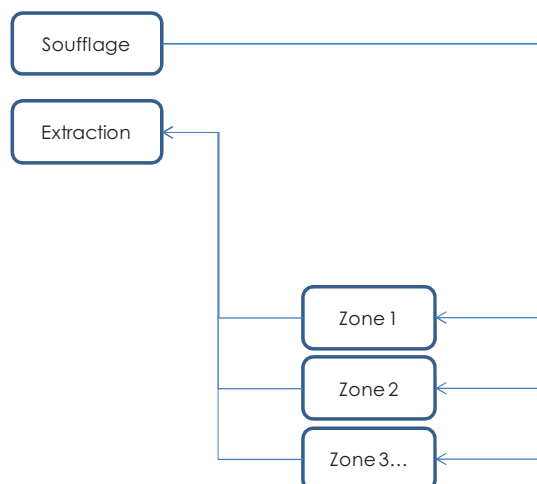


Figure 145. Schéma de la ventilation d'été – Double flux sans récupération de la chaleur

Équation 8

$$\begin{aligned} Q_{Total} &= m_{\text{sup ply}}(h_{\text{sup plyoutlet}} - h_{\text{Exhaustinlet}}) \\ Q_{Sensible} &= m_{\text{sup ply}}(h_{\text{Supplyoutlet}} - h_{\text{Exhaustinlet}}) \text{ HR min} \\ Q_{Latent} &= Q_{Total} - Q_{Sensible} \end{aligned}$$

Où

$$Q_{\text{Total}} = \text{énergie totale fournie à la zone [J]}$$
$$Q_{\text{sensible}} = \text{énergie totale fournie à la zone [J]}$$
$$Q_{latent} = \text{énergie totale fournie à la zone [J]}$$
$$m_{\text{Supply}} = \text{Débit massique fourni à la zone [kg/s]}$$
$$h_{\text{SupplyOutlet}} = \text{Enthalpie de l'air fournie à la zone}$$
$$h_{\text{ExhaustInlet}} = \text{Enthalpie de l'air extrait de la zone}$$

HR_{min} = Enthalpie calculée à humidité constante (Humidité de l'air extrait ou de l'air fourni)

2.1.4 Modélisation du chauffage et du rafraîchissement

La demande de chauffage est fonction de la température de consigne à l'intérieur des pièces (étages/bureaux). Pour le chauffage nous avons défini une température de consigne de 22°C et pour le rafraîchissement de 24°C. Les réseaux de distribution de chaleur et de froid n'ont pas été modélisés pour simplifier notre modèle.

2.1.5 Modélisation du bouclier thermique

Dans la section 2.25, nous avons présenté la modélisation 3D du bouclier. Nous avons représenté le bouclier comme une protection solaire extérieure, de cette manière nous avons pu recréer la forme. Le bouclier se caractérise par un taux d'occultation qui est défini comme le rapport entre la surface transparente surface totale.

Équation 9

$$\text{Taux d'occultation (\%)} = 1 - \frac{\text{Surface transparente}}{\text{Surface totale de la maille}}$$

NOTA : Les taux d'occultation ont été obtenus par des mesures, ce travail a été réalisé dans le cadre d'une mission du groupe Elithis, le rapport peut être consulté sur place (Hatenberger, 2011).

Au total 567 mesures ont été obtenues. A partir de cela et en fonction de la courbe solaire pour Dijon, nous avons déterminé les taux d'occultation pour les 37 trames qui composent notre modèle. Le Tableau 42 présente les taux d'occultation pour les mois de juin et décembre, périodes de simulation :

Tableau 42. Taux d'occultation bouclier thermique (Elithis Groupe)

[illegible]

[illegible]

Pour le mois d'hiver, décembre, les valeurs sont plus faibles, le soleil plus bas pénètre plus facilement le bouclier, le bâtiment peut donc, bénéficier d'un apport solaire et lumineux plus important. L'été, le bouclier protège mieux le bâtiment, notamment au sud. En revanche, nous pouvons voir qu'au début de la journée et en fin de journée, le bouclier ne permet pas de protéger le bâtiment de manière efficace.

Le bouclier thermique de la Tour a été modélisé comme une surface extérieure au bâtiment, (masque). Pour chaque trame un scénario de transmission (Tableau 42) a été défini. Le calcul du rayonnement reçu par le bâtiment s'effectue par la méthode du « ray tracing ». Par exemple pour une surface de 3 X 5 m elle reçoit environ 4 points (Figure 146) :

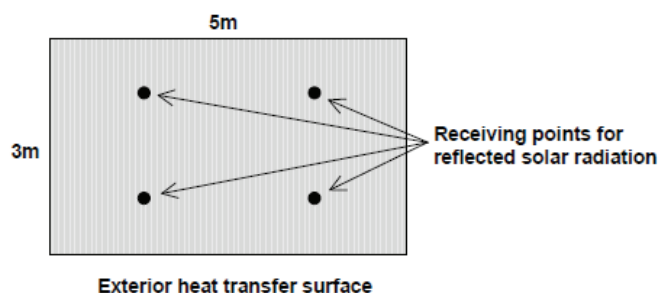


Figure 146. Distribution solaire dans une surface

Sur chaque point des « lignes » sont, donc tracés (environ 90) pour déterminer ensuite quelle est le pourcentage qui sont bloquées par l'élément (Ex. protection solaire), qui sont reçus par le ciel, le sol et le bâtiment lui-même (Figure 147).

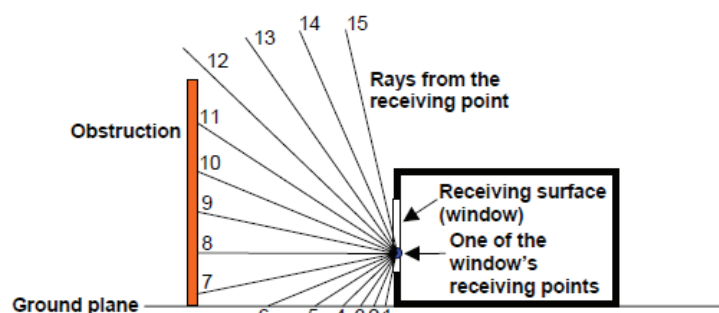


Figure 147. Méthode - Ray Tracing

2.3 Données météorologiques

Suite à des différents constats réalisés au niveau de la station météo, nous nous sommes posés la question quant à la fiabilité des données fournit pas la GTC. Nous avons donc, comparés des fichiers météo de Weather Analytics (<http://www.weatheranalytics.com/wa/>) avec les données fournit par la GTC. Nous avons comparé les valeurs de température, du rayonnement solaire total, de vitesse.

2.3.1 Hiver

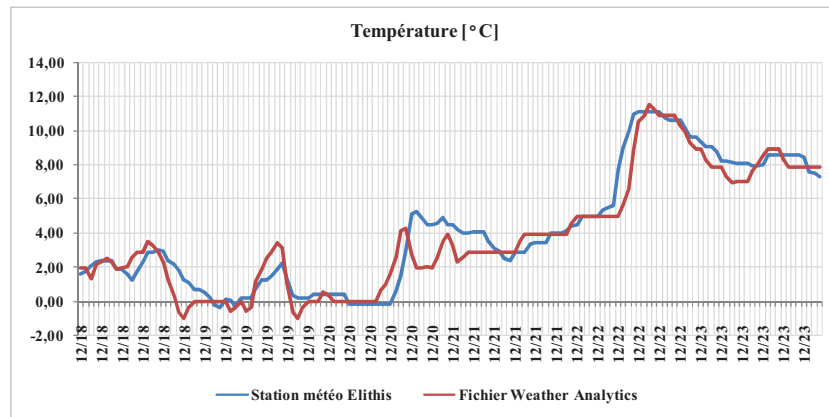


Figure 148. Température extérieure - Semaine du 18 au 23 décembre

De manière générale, la distribution des valeurs est assez proche. En revanche, nous pouvons observer des différences, les valeurs des températures extérieures du fichier météo sont plus faibles que celles données par la GTC. La demande en chauffage peut se voir influencée par ce paramètre.

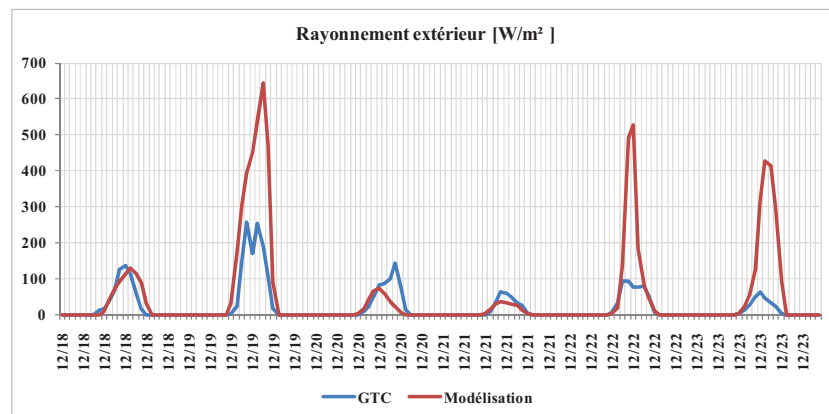


Figure 149. Rayonnement solaire - Semaine du 18 au 23 décembre

Au niveau du rayonnement solaire, notre fichier météo présente un rayonnement solaire plus important, ce qui peut impacter fortement la demande. Les différences observées proviennent de la méthode de calcul utilisé par Weather Analytics. Leurs données ne sont pas mesurées mais extrapolées en fonction des données de Météo France et la NASA. Les données de la GTC en revanche, sont celles mesurées pas une station météo placée en toiture du bâtiment. Nous pouvons observer des fortes disparités, notamment le lundi, jeudi et vendredi.

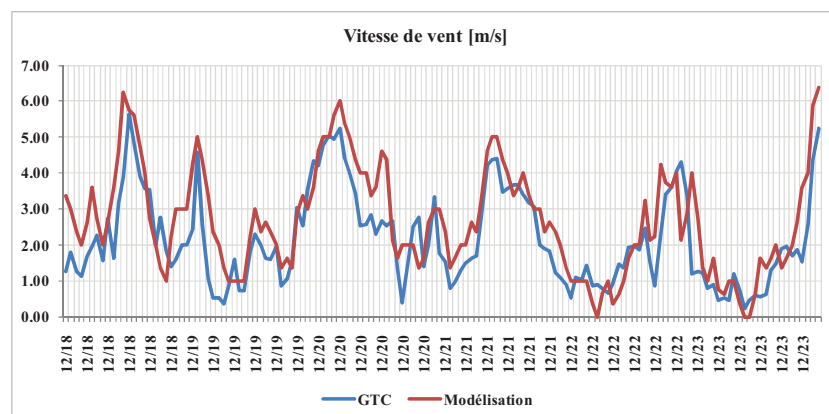


Figure 150. Vitesse de vent - Semaine 18 au 23 décembre

En ce qui concerne le vent, nous pouvons observer une distribution des valeurs assez proche. En revanche, des différences entre les valeurs sont observées. La vitesse de vent est légèrement plus élevée avec le fichier utilisé dans notre modélisation.

2.3.2 Été

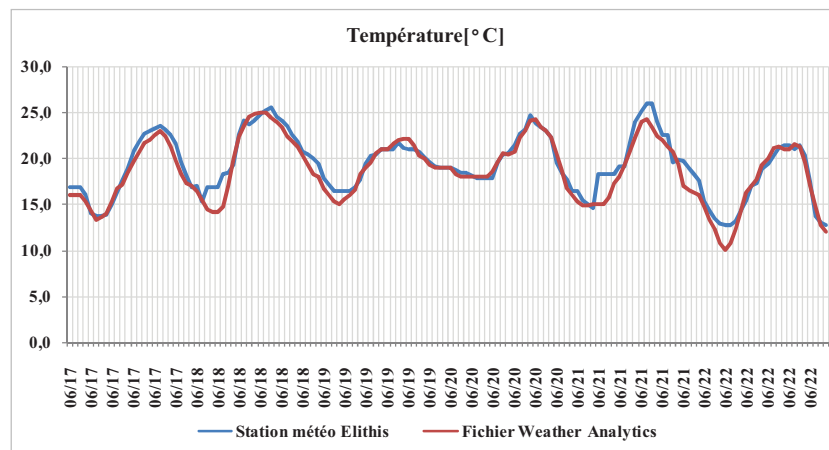


Figure 151. Température extérieure

De manière générale, la distribution des valeurs est assez proche. Les températures sont légèrement plus basses dans notre fichier météo mais les différences ne sont pas très importantes.

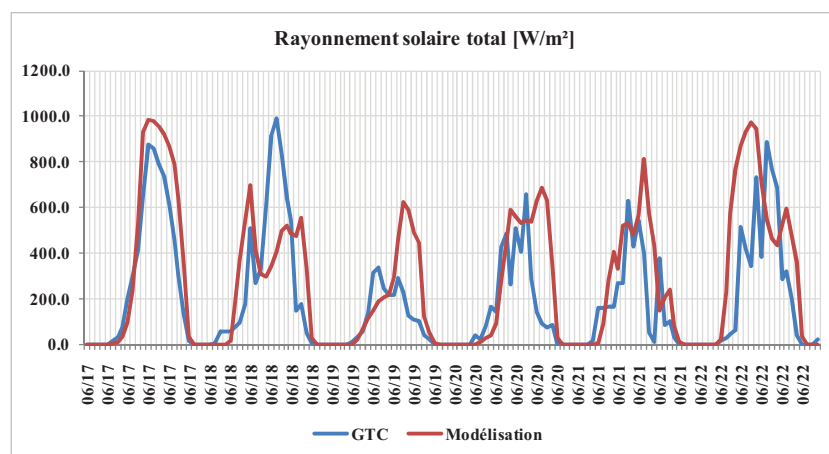


Figure 152. Rayonnement solaire total

Concernant le rayonnement solaire, au niveau de la distribution, celle-ci est assez similaire, des différences sont observées entre les valeurs.

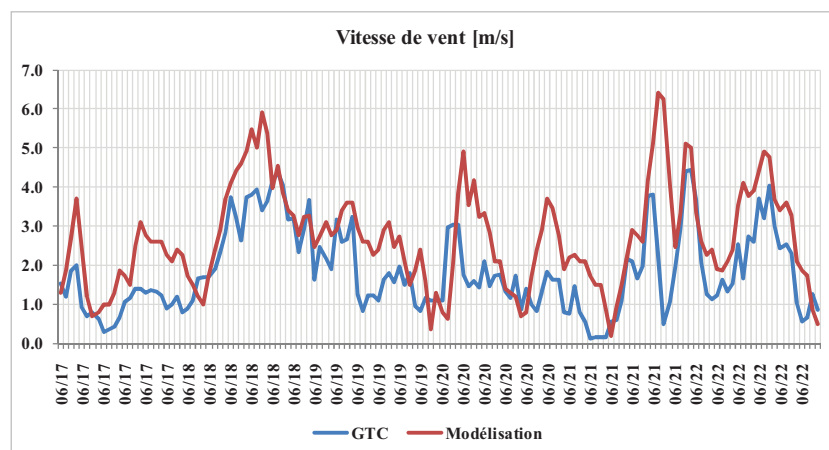


Figure 153. Vitesse de vent

Les valeurs du fichier météo utilisé dans nos modélisations sont globalement plus élevées. Nous pouvons observer des différences plus importantes mais qui s'expliquent par l'emplacement de la station météo.

De manière générale, nous avons pu observer que la distribution des valeurs est assez proche. En revanche, sur certains critères les valeurs présentent des différences. La station météo, subit des fortes perturbations liées au vent à cause de la hauteur du bâtiment et des panneaux photovoltaïques. Il est difficile de dire si les valeurs fournies par la GTC sont fiables. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'utiliser les fichiers météo de Weather Analytics.

3. MODELES UTILISES

Avec le modèle du bâtiment et le fichier défini, nous avons modélisé le bâtiment. Pour nos modélisations, nous avons défini deux périodes, hiver et été. Notre objectif est de comparer les demandes en chaud et froid entre nos modélisations et la GTC du 4^{ème} étage. Avant de présenter les résultats, nous allons décrire les modèles utilisés.

3.1 Profil du terrain

La Tour Elithis se trouve dans un emplacement urbain assez dense. Elle est entourée par des bâtiments d'une hauteur considérable. Dans EnergyPlus nous avons choisi dans un premier temps l'emplacement, l'impact qui est exercé par le vent dépend de la localisation du bâtiment. Il est défini par :

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{z_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha}$$

Où	Z	=	Altitude
	V _Z	=	Vitesse de vent en Z
	α	=	Coefficient en fonction du profil de la vitesse de vent (0.22 pour un site urbain)
	δ	=	Coefficient qui est fonction de l'épaisseur de la couche (370 pour un site urbain)
	Z _{met}	=	Hauteur à laquelle se trouve le capteur de la station météo
	V _{met}	=	Vitesse de vent mesurée par la station météo
	α _{met}	=	Coefficient du profil de vitesse donnée (station météo)
	δ _{met}	=	Coefficient pour l'épaisseur de la couche (station météo)

3.2 Distribution solaire

Pour la modélisation de la distribution solaire dans l'espace intérieur du bâtiment, 5 modèles sont proposés :

- Minimal shadowing
- Full exterior
- Full interior and exterior
- Full exterior with reflections
- Full interior and exterior with reflections

Nous avons utilisé le modèle « full intérieur and exterior », qui permet une bonne prise en compte de la lumière diffuse et direct. Les autres modèles se sont avérées instables. La forme du bâtiment est assez complexe pour la simulation. Nous avons testé avec les autres modèles et peu de différences ont été observées en revanche, le temps de calcul évolue de manière importante.

3.3 Transfert de chaleur surfacique

Pour déterminer le transfert de chaleur sur une surface l'équation utilisée est la suivante :

Équation 10

$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{surf} - T_{air})$$

Pour la détermination de coefficients d'échange h_c, 4 modèles sont proposés :

- Simple
- TARP
- MoWiTT
- DOE-2
- Adaptive Convection Algorithm

La figure suivant présente les modèles proposés par EnergyPlus :

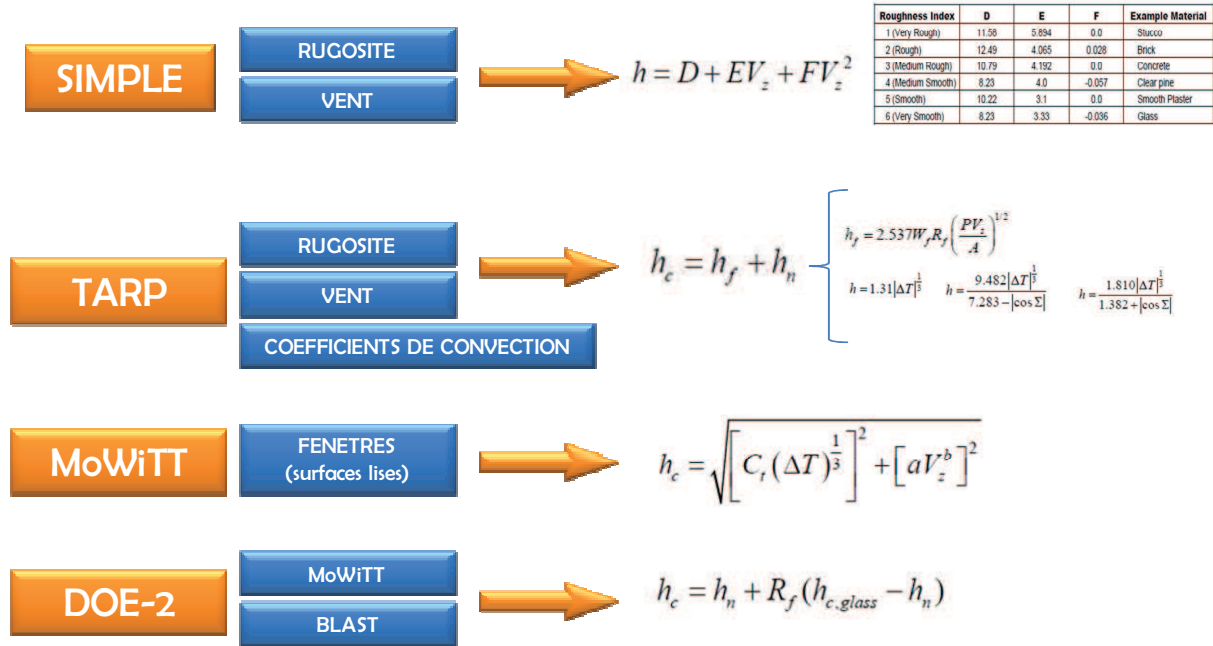


Figure 154. Algorithmes Coefficient d'échange convectif

Le « Adaptive Convection Algorithm » permet d'optimiser le calcul du coefficient dans les cas d'un bâtiment avec une architecture plus complexe. Ce dernier classe les parois en 4 types selon la localisation, la direction du flux de chaleur et la direction du vent, le seul inconvénient avec cette méthode c'est le temps de calcul.

Clara SPITZ dans sa thèse discute à propos de l'incertitude qui peut exister pour le calcul des coefficients d'échange. L'analyse qu'elle réalise est faite sur le modèle TARP (SPITZ, 2012) qui semble donner de bons résultats. C'est la raison pour laquelle nous l'avons retenue pour nos modèles.

3.4 Bilan thermique

Pour le bilan thermique trois modèles de calcul sont proposés :

- Fonctions de Transfert (CTF). Elles permettent simplement de résoudre le bilan thermique du bâtiment, en tenant compte de la chaleur sensible.
- Différences finies (CondFD). Cette technique de solution utilise une solution de différences finies 1-D dans les éléments de construction.
- EMPD qui détermine l'interaction de l'humidité et chaleur dans les parois.
- HAMT qui, en plus de l'EMPD, intègre les notions d'élément finis.

Les fonctions de transferts CTF, est la relation la plus élémentaire pour la détermination du flux dans un élément de construction, elles sont définies par la relation suivante :

Équation 11. CTF modèle

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta}$$

Où q'' est le flux de chaleur, T est la température, i signifie l'intérieur de l'élément de construction, o signifie l'extérieur de l'élément de construction, t représente le pas de temps en cours, et X et Y sont les facteurs de réponse. Les fonctions de transfert de conduction sont une méthode efficace pour calculer les flux de chaleur de surface car ils éliminent la nécessité de connaître les températures et les flux dans la surface. C'est la méthode qui est utilisée par défaut pour EnergyPlus.

La méthode des différences finies, ne remplace pas la méthode CTF mais elle sert comme un complément, dans les cas où des matériaux à changement de phase sont présents ou à conductivité thermique variable (EnergyPlus, 2013).

L'humidité a peu d'effet sur les performances du système de chauffage, mais un effet profond sur la performance des systèmes de conditionnement d'air. Afin de décrire avec précision les performances pendant les périodes de refroidissement il est très important de connaître l'humidité de l'immeuble. Si l'on suppose que l'humidité est contenue seulement dans les pièces, alors on ne tient pas compte du fait que les matériaux qui la délimitent (par exemple, les surfaces murales, mobilier, linge de maison, etc) peuvent entreposer et libérer l'humidité. Supposer que seule l'humidité contenue dans l'air d'une pièce peut influencer la consommation de froid est une affirmation qui n'est pas juste et elle peut conduire une erreur importante dans la prédiction des charges du système de refroidissement. Le modèle EMPD est une approche simplifiée qui permet de simuler l'adsorption et la désorption de l'humidité dans les parois, le modèle est décrit dans la notice d'EnergyPlus (EnergyPlus, 2013). Le modèle HAMT c'est un algorithme de solution qui couple le modèle de transfert à une dimension, par éléments finis, de la chaleur et de l'humidité simulant le mouvement et le stockage de la chaleur et de l'humidité des surfaces. Il fournit des profils de température et d'humidité à travers les murs, et aide à identifier les surfaces avec une forte humidité de surface.

Ces méthodes bien qu'intéressantes, nécessitent d'une information assez précise sur les teneurs en eau des murs. Notre travail ne se focalise pas sur cette thématique des transferts d'humidité et chaleur combinés, pour cette raison, nous avons choisi le modèle de transfert (CTF).

3.5 Bilan thermique de l'air

De manière générale, pour déterminer les températures et humidités dans le bâtiments EnergyPlus propose trois méthodes :

- La méthode d'Euler
- La méthode analytique
- La méthode de différences finies de troisième ordre.

L'équation qui décrit le bilan thermique d'une zone est le suivant :

Équation 12

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z)$$

Le premier terme fait référence aux charges internes (\dot{Q}_i), le deuxième aux transferts surfaciques ($hA\Delta T$), le troisième aux transferts entre zones ($\dot{m}C_p\Delta T$), le quatrième aux transferts dus aux infiltrations et le dernier aux transferts dans les systèmes. Pour la résolution la méthode d'Euler utilise la relation suivante :

Équation 13

$$\frac{dT}{dt} = (\delta t)^{-1} (T_z^t - T_z^{t-\delta t}) + O(\delta t)$$

Qui est donc, substitué dans l'équation 12, pour prendre la forme suivante :

Équation 14

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)}$$

A partir de cette équation EnergyPlus peut déterminer les températures. Cette méthode peut présenter parfois des limites avec des temps de calcul petits. Pour remédier cela, la méthode des différences finies utilise la relation suivante :

Équation 15

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3)$$

La méthode de différences finies de troisième ordre prend la forme suivante :

Équation 16

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply} - \left(\frac{C_z}{\delta t} \right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\left(\frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}$$

C'est la méthode utilisée par défaut dans EnergyPlus. La méthode analytique, c'est une approche d'intégration qui est définie par l'équation suivante :

$$T_z^t = \left(T_z^{t-\delta t} - \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p} \right) * \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}{C_z} \delta t \right) + \frac{\sum_{i=1}^{N_d} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}$$

3.6 Confort thermique

Pour la modélisation du confort thermique, nous avons utilisé la méthode de Fanger (Fanger, 1973). Celle-ci est définie dans le moteur de calcul EnergyPlus. L'algorithme est le suivant :

La personne est en équilibre thermique avec son environnement :

$$M = L$$

M est le métabolisme et L, la perte d'énergie. Le PMV est obtenu comme une relation entre la perte d'énergie (L) et le métabolisme (M), il est calculé de la manière suivante :

$$L = Q_{res} + Q_{dry} + E_{sk} + W$$

$$Q_{res} = E_{res} + C_{res} = 0.0023M(44 - P_a) + 0.0014M(34 - T_a)$$

$$Q_{dry} = Q_c + Q_r \rightarrow Q_c = h_c \times f_{cl}(T_{cl} - T_a)$$

$$Q_r = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cla}^4 - T_{ra}^4)$$

$$\text{For } H > 58.2, E_{rsW} = 0.42(H - 58.2)$$

$$E_{sk} = E_{rsW} + E_{diff} \rightarrow \text{For } H \leq 58.2, E_{rsW} = 0$$

$$E_{diff} = 0.68 \times 0.61(P_{sk} - P_a) = 0.4148(P_{sk} - P_a)$$

$$\begin{aligned} & \rightarrow P_{sk} = 1.92T_{skr} - 25.3 \\ & \rightarrow T_{skr} = 35.7 - 0.028H \end{aligned}$$



$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)(H - L)$$

Le pourcentage d'insatisfaction est calculé avec l'équation suivante :

Équation 17

$$PPD = 100.0 - 95.0 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)$$

A partir de données obtenues avec le suivi du confort (Chapitre III), nous avons défini les valeurs de résistance thermique des vêtements et de vitesse d'air. Nous avons obtenu les valeurs de PMV et PPD pour l'étage 4, pour la semaine d'hiver et d'été.

3.7 Qualité de l'air

Pour la modélisation de la QAI, EnergyPlus permet d'estimer la concentration d'un polluant en fonction d'un débit d'émission. Le bilan massique d'une zone avec la présence d'un polluant est exprimé de la manière suivant dans EnergyPlus :

Équation 18

$$\begin{aligned} \rho_{air} V_z M_{for} \frac{dC_{f,z}^t}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{source}} \rho_{air} G_{f,i} * 1.0^6 - \rho_{air} \sum_i^{N_{sink}} R_{f,i} C_{f,z} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i (C_{f,z,i} - C_{f,z}^t) + \dot{m}_{inf} (C_{f,\infty} - C_{f,z}^t) \\ & + \dot{m}_{sys} (C_{f,sup} - C_{f,z}^t) + \sum_j h_j \rho A_j \left(\frac{C_{s,j}}{k_j} - C_{f,z} \right) + S_f (C_{f,z}^{t-\delta t}) \end{aligned}$$

Le premier terme (ρG_f), fait référence aux contaminants intérieurs, le deuxième ($\rho R_f C_f$), aux filtres et autres systèmes capables de piéger et/ou éliminer les polluants, le troisième ($m \Delta C$) c'est le transferts des polluants entre zones, le quatrième ($m_{inf} \Delta C$) c'est le transfert du aux infiltrations et à la ventilation, le cinquième ($m_{sys} \Delta C$) c'est le transfert par les systèmes (chauffage/climatisation), le sixième ($h \rho A \Delta C$) c'est la diffusion du polluants à travers le surfaces et l'air et le dernier ($S_f C$) c'est la production ou élimination du polluant en fonction de la concentration dans le temps précédent. De cette manière la concentration finale du polluant est obtenue. Pour la détermination de la concentration il est donc, nécessaire de connaître les sources d'émission, dans EnergyPlus ils sont exprimés en [m^3/s].

Pendant les campagnes de mesures de la QAI, deux polluants ont montré des concentrations légèrement supérieures aux valeurs limites, le formaldéhyde et le benzène. Nous avons défini le formaldéhyde comme traceur de la QAI par sa toxicité et son évolution en fonction de la température. Pour la modélisation de la QAI, nous avons pris comme référence le 4^{ème} étage.

Les émissions de formaldéhyde par type de matériaux ont été déterminées par l'ASPA (Chapitre III) en $\mu g/s m^2$. Nous avons, donc calculé les valeurs d'émission en fonction des surfaces, pour obtenir une valeur par bureau. Le Tableau 43 présente ces valeurs :

Tableau 43. Débits d'émission de formaldéhyde en fonction de la surface et du bureau

	1. Sol	2. Cloisonnement	3. Plafond	4. Placard	5. Mur en béton	6. Portes intérieures	7. Allèges bois	8. Bureaux et blocs à roulettes	
Bureaux	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	Formaldéhyde	TOTAL [m³/s]
1-2	4,93E-11	1,45E-11	1,02E-10	2,07E-11	0,00E+00	9,52E-13	2,60E-12	2,71E-12	1,93E-10
3-4	3,83E-11	1,43E-11	7,92E-11	3,31E-11	0,00E+00	9,52E-13	1,95E-12	0,00E+00	1,68E-10
5-6-7	1,28E-10	1,44E-11	2,66E-10	0,00E+00	0,00E+00	1,90E-12	4,55E-12	2,71E-11	4,42E-10
8	3,55E-11	1,44E-11	7,35E-11	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,37E-10
9	3,62E-11	1,43E-11	7,49E-11	6,21E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,36E-10
10-11	6,75E-11	1,43E-11	1,40E-10	2,07E-11	0,00E+00	9,52E-13	2,60E-12	5,42E-12	2,51E-10
12-13	5,69E-11	1,43E-11	1,18E-10	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	2,60E-12	5,42E-12	2,06E-10
14-15	4,23E-11	1,43E-11	8,76E-11	4,14E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,95E-12	0,00E+00	1,51E-10
16	4,23E-11	1,44E-11	8,76E-11	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,95E-12	2,71E-12	1,58E-10
17-18	5,69E-11	1,44E-11	1,18E-10	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	2,60E-12	5,08E-12	2,06E-10
19-20	5,67E-11	1,43E-11	1,17E-10	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	2,60E-12	5,42E-12	2,06E-10
21-22	4,23E-11	1,43E-11	8,76E-11	6,21E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,95E-12	2,71E-12	1,56E-10
23	3,45E-11	1,43E-11	7,13E-11	6,21E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,31E-10
24	3,62E-11	1,43E-11	7,50E-11	6,21E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,37E-10
25	3,62E-11	1,43E-11	7,50E-11	8,28E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,39E-10
26	3,62E-11	1,43E-11	7,50E-11	4,14E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,35E-10
27	3,62E-11	1,43E-11	7,50E-11	4,14E-12	0,00E+00	9,52E-13	1,30E-12	2,71E-12	1,35E-10
28	2,79E-10	1,50E-11	5,78E-10	4,14E-12	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-12	2,71E-12	8,80E-10
Coulotr	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,67E-10	2,19E-11	0,00E+00	0,00E+00	7,89E-10
29-30	5,36E-11	1,43E-11	1,11E-10	1,66E-11	0,00E+00	0,00E+00	2,60E-12	5,42E-12	2,04E-10
31-32	4,92E-11	1,44E-11	1,02E-10	1,24E-11	0,00E+00	0,00E+00	2,60E-12	2,96E-12	1,84E-10

Nous pouvons observer que les valeurs les plus importantes sont données par les plafonds et les sols, en deuxième nous avons les cloisons et les placards. Pour la modélisation de la concentration de formaldéhyde et de manière générale des polluants, les valeurs d'émission doivent être rentrées par zone, elles sont présentées en dernière colonne (TOTAL).

Les tests d'émission des composants pour les matériaux sont faits selon des protocoles bien définis (AFSSET, 2009). Les conditions thermiques d'analyse sont bien définies et constantes, température de 25°C, une humidité de 50% et un taux de renouvellement d'air de 0.5 vol/h. Ces tests sont réalisés pendant 28 jours et c'est ensuite qu'un résultat est obtenu. Dans la réalité, la température et humidité d'une pièce varient constamment. Cela peut modifier considérablement l'émission des matériaux. Dans notre cas nous avons vu qu'en fonction de la saison, la concentration de formaldéhyde avait varié fortement.

La concentration moyenne obtenue par le biais de la modélisation est de 26 µg/m³. Ce calcul ne tient pas compte de l'influence de la température, ni de l'humidité sur les valeurs finales. Pour pouvoir observer l'évolution de la concentration de formaldéhyde en fonction de la température, nous avons proposé, donc une méthode.

3.7.1 Proposition de méthode pour l'analyse de la concentration de formaldéhyde

Srinandini a montré que la concentration de formaldéhyde en fonction de la température varie de 1.9 à 3.5 fois pour chaque 10°C de température de différence et de 1.8 à 2.6 pour chaque 35% d'humidité relative supplémentaire. (Srinandini, et al., 2010).

Dans le cas de la Tour Elithis, la concentration en formaldéhyde entre l'hiver, 3 µg/m³, et l'été, 26 µg/m³, a augmenté de 8.6 fois. La température opérative moyenne que nous avons obtenue avec nos modélisations pendant l'hiver est de 18° et l'été de 26°C, une différence d'environ 8°C. Aux niveaux de températures radiantes moyennes elles ont été de 17°C pour l'hiver et 27°C, pour l'été, une différence de 10°C. Au niveau de l'humidité relative nous avons mesuré une humidité moyenne de 18% pendant l'hiver et de 47% pendant l'été, cela donne une différence de 30% de HR.

Entre l'hiver et l'été, nous avons observé une évolution de la température radiante moyenne de 10°C, en prenant une évolution moyenne de 2.7 (Srinandini, et al., 2010) au niveau de la température, nous obtenons une concentration théorique de 8.1 µg/m³. Si à cela nous ajoutons l'influence de l'humidité, un facteur de 2.2, nous obtenons une concentration théorique de 17 µg/m³. Si nous prenons les valeurs maximales 3.5 pour la température et 2.6 pour l'humidité, nous obtenons une concentration de 27 µg/m³, valeur très proche de celle qui a été observée dans la Tour Elithis (26 µg/m³)

Pour nos modélisations nous prendrons en compte l'évolution de la concentration en fonction de la température. Nous prenons donc, un facteur de 2.8 pour estimer l'évolution de la concentration. A partir de la température radiante moyenne, nous pouvons estimer l'évolution de la concentration de formaldéhyde.

En prenant la concentration maximale mesurée de 26 µg/m³ obtenue avec des conditions de température et humidité constantes de 25°C et 50%, respectivement. Nous pouvons estimer l'évolution de la concentration de formaldéhyde de la manière suivante :

A partir de la Température Radiante Moyenne (TRM) et une valeur de référence de 25°C, nous pouvons calculer les écarts de température par rapport à cette valeur :

Équation 19

$$TRM - 25^{\circ}\text{C} = \Delta^{\circ}\text{C}$$

La concentration de formaldéhyde peut évoluer de 1.9 à 3.5 fois tous les 10°C (Srinandini, et al., 2010), en prenant une valeur moyenne de 2.8, nous obtenons un facteur de 0.28 par 1°C de différence. A la concentration moyenne obtenue par modélisation nous pouvons appliquer le facteur suivant :

Équation 20

$$\Delta^{\circ}\text{C} \times 0.28 = \text{Facteur d'Evolution de la Concentration de Formaldéhyde (FECF)}$$

Si le Delta obtenu dans la Équation 19 est inférieur à « 0 », nous divisons la concentration obtenue par la modélisation par le facteur FECF, si le Delta (Équation 19) est supérieur à « 0 », nous multiplions la concentration par le facteur FECF.

$$\text{Si } \Delta^{\circ}\text{C} < 0 = \text{Concentration de formaldéhyde} / 0.28$$

$$\text{Si } \Delta^{\circ}\text{C} > 0 = \text{Concentration de formaldéhyde} \times 0.28$$

$$\text{Si } \Delta^{\circ}\text{C} = 0 = \text{Concentration de formaldéhyde}$$

De cette manière, nous pouvons prendre en compte l'évolution de la concentration de formaldéhyde en fonction de la saison.

4. RESULTATS ET ANALYSES DE LA MODELISATION

Dans les sections précédentes, nous avons présenté le modèle numérique du bâtiment ainsi que les hypothèses de modélisation de la Tour Elithis. A partir des fichiers météo, nous avons fait une simulation sur les mois de décembre 2011 et juin 2012, périodes dans lesquelles se trouvent respectivement nos semaines de référence d'hiver et d'été. Nous avons comparé les résultats de la simulation numérique avec les besoins en chaud et en froid du 4^{ème} étage obtenus directement par la GTC du bâtiment.

4.1 Demande énergétique – Semaine hiver

Dans la figure 155, nous pouvons observer en bleu les besoins réels en chaud du bâtiment et en rouge les besoins calculés par la modélisation.

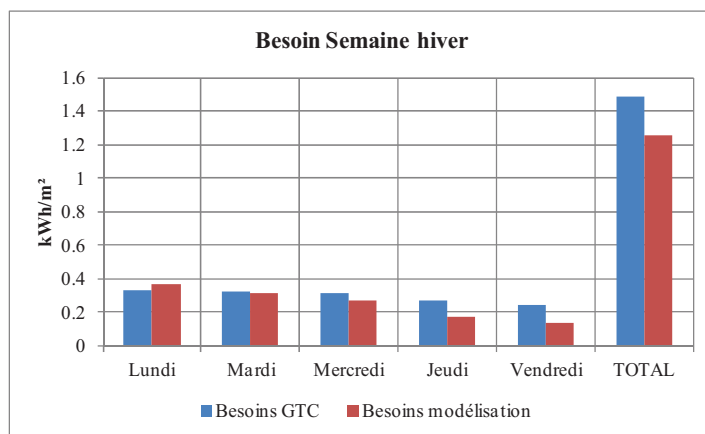


Figure 155. Besoin chaud - Semaine hiver

Les résultats obtenus montrent des valeurs très rapprochées entre les deux scénarios. De manière générale, nous pouvons voir que l'évolution de la demande de chauffage entre les deux résultats a un comportement similaire. Le lundi la valeur est plus importante et diminue jour par jour. Les besoins pour la semaine d'hiver pour l'étage, ont été estimés à 1.48 kWhEF/m² (GTC) contre 1.15 kWhEF/m² (modélisation). Cela représente un écart de 22%. Cet écart peut s'expliquer par le fait que le modèle numérique ne tient pas compte du rendement de l'émission de chauffage (poutres climatiques).

4.2 Demande énergétique – Semaine été

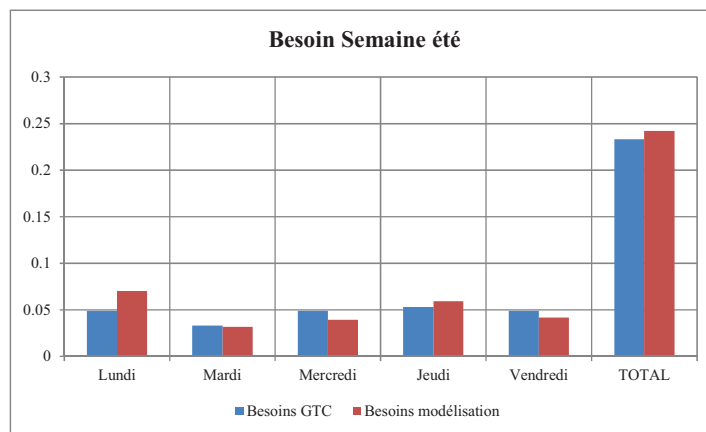


Figure 156. Distributions de besoins en froid - Semaine du 18 au 22 juin 2012

Pour la période de référence d'été, nous avons calculé, avec le modèle numérique, une demande totale en froid de 0.242 kWhEF/m² contre 0.233 kWhEF/m² observée en réalité. Nous obtenons une différence d'environ 4% entre les deux approches. De la même façon que pour l'hiver, cet écart peut s'expliquer par le rendement des émetteurs. L'écart est moins important puisque la demande en froid pendant cette période est très faible. Le rafraîchissement est fait en priorité par une ventilation double flux sans récupération d'énergie sur l'air extrait.

Après analyse, nous pouvons dire que le modèle que nous avons défini de la Tour Elithis est bien plus représentatif de la réalité pour la période d'été que pour la période d'hiver. Nous constatons tout de même que le modèle est valable pour les deux périodes étudiées.

4.3 Températures intérieures

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les températures intérieures pour la semaine de référence d'hiver. En rouge les valeurs obtenues de la GTC et en bleu celles issues de notre modèle numérique :

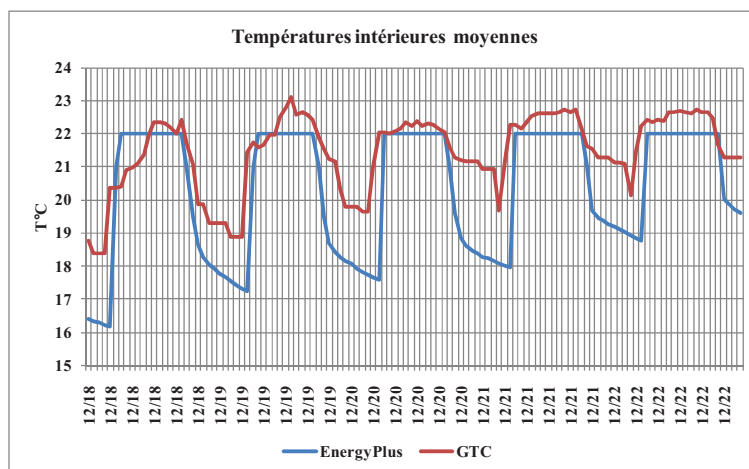


Figure 157. Températures intérieures moyennes – Semaine d'hiver

Des différences importantes sont constatées entre les deux séries de valeurs notamment pendant les périodes d'occupation des bureaux. Le soir, les températures calculées sont nettement plus basses que celles mesurées. Les sondes de prise de température se situent en faux plafond à proximité des bouches d'extraction. Cela n'est pas gênant si l'on considère que l'air est en mouvement et à température homogène dans la pièce lorsque la ventilation est en fonctionnement. La nuit en revanche, quand la ventilation est à l'arrêt, l'air chaud se place en partie haute des locaux. Cela a un impact négatif sur la fiabilité de la mesure réalisée. Le positionnement des sondes ne permet pas d'effectuer des mesures de façon efficace. (figure 158).

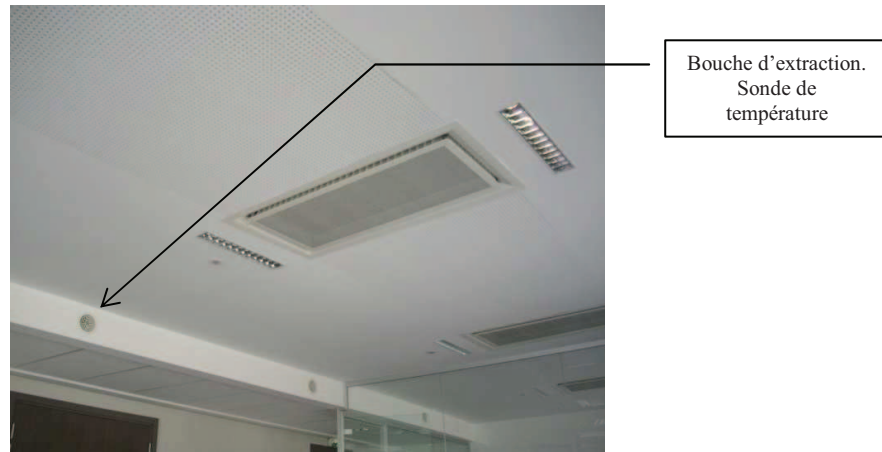


Figure 158. Sondes de référence pour la température

Pendant la semaine d'été, nous pouvons aussi observer des différences importantes. La Figure 159 présente les valeurs :

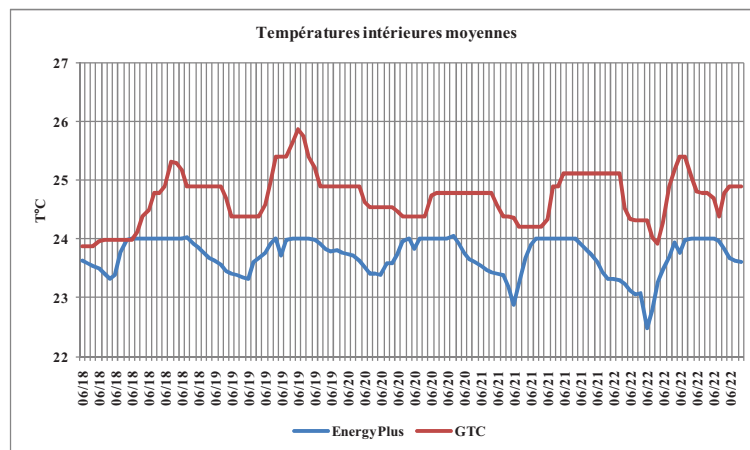


Figure 159. Températures intérieures moyennes – Semaine d'été

Le constat est le même, les températures mesurées par la GTC sont bien plus importantes que les valeurs calculées avec le modèle numérique. La Figure 160, montre l'écart existant entre la température mesurée par les sondes à proximité des bouches d'extraction et la température par nos sondes au niveau des plans de travail des bureaux pendant une journée d'hiver.

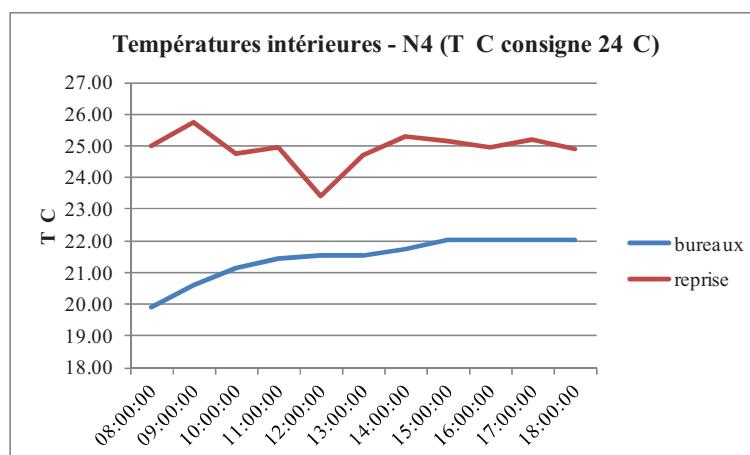


Figure 160. Delta entre la température de référence et la température au niveau des bureaux

La consigne de chauffage lors de ces mesures était de 24°C. Nous constatons un écart de 3°C en moyenne entre les deux séries de valeurs. Si l'ambiance n'est pas chauffée uniformément, les valeurs mesurées par les sondes de températures seront fausses. Cela explique le comportement des valeurs observé dans la Figure 157 et la Figure 159.

4.4 Qualité de l'air

Les analyses des émissions d'aldéhydes sur les matériaux prélevés au 4^{ème} étage, ont été réalisées par l'ASPA dans des conditions de températures et d'humidité ambiantes bien définies. Ces conditions sont présentées dans le tableau 44 :

Tableau 44. Conditions de température et humidité pendant les prélèvements réalisés par l'ASPA

Matériaux	Température prélèvement [°C]	Humidité ambiante [%]
1. Sol PVC collé (n°12)	25.4	47.7
2. Cloisonnement modulable	23.8	47.7
3. Plafond en plaques de	23.8	47.7
4. Placard en métal peint	23.2	47.7
5. Mur en béton peint sur le	25.3	47.7
6. Portes intérieures (n°17)	25.0	47.7
7. Panneaux bois	25.0	47.7
8. Bureaux et blocs à	25.1	47.7
9. Banc d'accueil en bois	24.2	47.7

Les conditions ambiantes sont proches de celles stipulées par les protocoles (AFSSET, 2009). En même temps que ces mesures ont été effectuées, des prélèvements d'air intérieur avec les tubes Radiello® ont été réalisés. Cela avec l'objectif de corrélérer les valeurs d'émission obtenues par l'ASPA avec les valeurs observées par les prélèvements en temps réel sur l'air. Le tableau 45 montre les résultats de ces prélèvements :

Tableau 45. Concentrations d'aldéhydes

	Concentration [µg/m³]						
	Formaldéhyde	Acétaldéhyde	Propionaldéhyde	Butyraldéhyde	Benzaldéhyde	Isovaléraldéhyde	Valéraldéhyde
Bureau 1	14.5	12.7	1.4	2.0	2.5	2.7	1.6
Bureau 2	13.2	9.8	1.0	1.7	2.4	2.4	1.5
TOTAL	13.9	11.3	1.2	1.9	2.5	2.6	1.6

Dans le cas du formaldéhyde, la valeur moyenne est de $13.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En comparant cette valeur avec les résultats de la modélisation, nous retrouvons une concentration théorique proche des valeurs mesurées (tableau 45) :

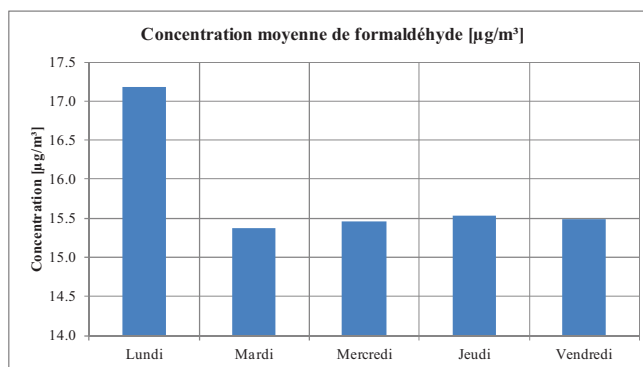


Figure 161. Concentration moyenne calculée avec les modélisations

La concentration moyenne calculée en formaldéhyde est de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour tous les jours de la semaine hormis le lundi. On observe que, pour la journée de lundi, la concentration est bien plus importante. Cela s'explique par le fait que la ventilation est arrêtée pendant tout le weekend faisant que la concentration de polluants s'élève considérablement. Nous retrouvons avec nos modélisations, des résultats assez proches de la réalité. L'algorithme de calcul des concentrations en polluants intégré au moteur de calcul EnergyPlus permet d'obtenir des valeurs fiables à condition que les paramètres thermiques soient ceux stipulés par le protocole.

Nous avons expliqué dans une section précédente la modélisation de la Qualité de l'Air intérieur dans EnergyPlus. A partir de cela et de la précédente analyse des données, nous considérons que notre modèle est fiable nous permettant d'avoir une approche réaliste de la QAI avec différentes stratégies de ventilation.

4.5 Confort thermique

En ce qui concerne le confort thermique, nous avons observé lors du suivi de celui-ci, (CHAPITRE III), un taux de satisfaction légèrement faible. Dans un premier temps, nous avons utilisé l'échelle de Fanger pour déterminer le

ressenti des utilisateurs par rapport aux températures de l'air intérieur (PMV). Nous avons ensuite déterminé le taux de satisfaction (PPD). La figure 162 montre les résultats des enquêtes de la période de référence du 19 au 23 décembre :

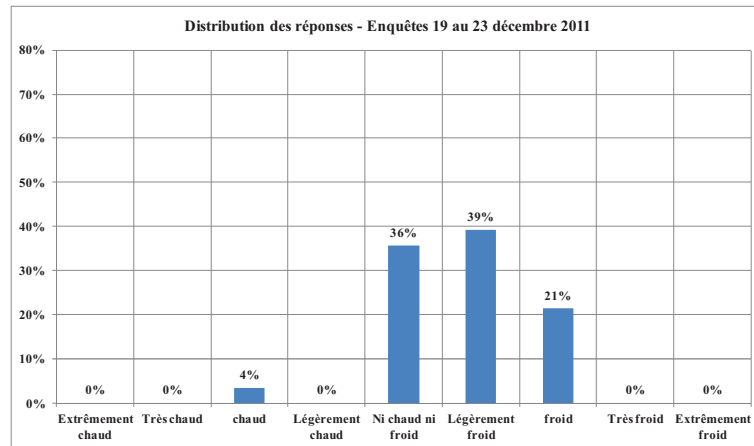


Figure 162. Distribution des réponses du confort thermique – Enquête semaine 19 au 23 décembre 2011

Ces résultats tiennent compte des variations de paramètres tels que la tenue vestimentaire, la vitesse d'air, le sexe et le métabolisme de personnes, l'exposition des personnes (Nord, sud, est, ouest). Du fait des nombreux paramètres à prendre en compte, la modélisation du confort thermique est complexe. Dans le modèle de Fanger, nous pouvons définir ces paramètres mais il est difficile d'intégrer leur constante évolution. Dans la réalité, les habitudes et le comportement des usagers varient en permanence. Les conditions thermiques et les consignes de fonctionnement du bâtiment aussi. Nous avons modélisé le confort en reprenant les informations que nous avons obtenues lors des enquêtes réalisées auprès des occupants (CHAPITRE III). La figure 163 présente les résultats obtenus :

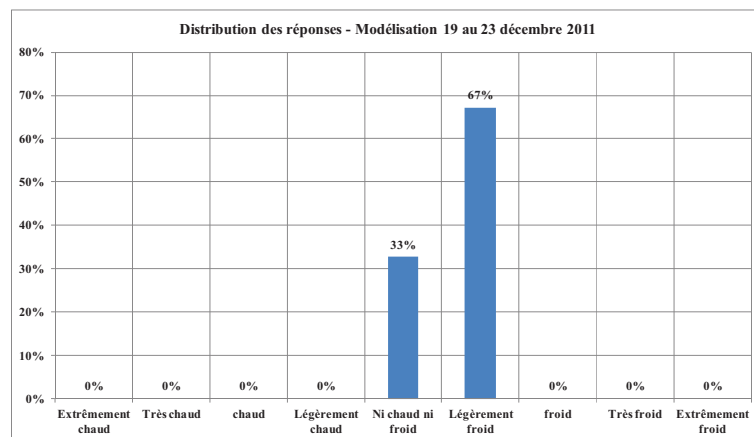


Figure 163. Distribution des réponses de confort thermique - Modélisation semaine 19 au 23 décembre

Les résultats obtenus par la modélisation numérique sont différents de ceux des enquêtes. En revanche, les résultats du ressenti « ni chaud ni froid », sont assez proches avec 33% pour la modélisation et 36% pour les enquêtes.

Une des difficultés majeures de la modélisation du confort réside dans le fait que les paramètres de calcul évoluent constamment. Or, la modélisation numérique ne permet pas de prendre en compte ces variations de façon réaliste. Même si le modèle permet la définition d'un scénario pour chaque paramètre il est difficile de déterminer le comportement des personnes et donc d'établir ces scénarios. La figure 164 montre les taux de satisfaction obtenus à partir des enquêtes réalisées pendant la semaine de référence d'hiver.

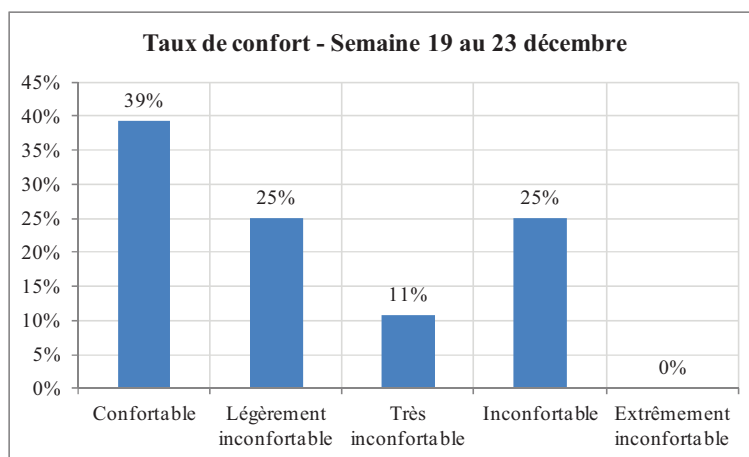


Figure 164. Distribution du taux de satisfaction – Enquêtes 19 au 23 décembre 2011

Les résultats des enquêtes nous montrent un taux de confort de 39%. Le taux d'inconfort observé est élevé à 36% si on tient compte des réponses « très inconfortable » et « inconfortable ». La question qui se pose est : comment doit-on interpréter la réponse « légèrement inconfortable » ? Dans nos enquêtes les usagers ont souvent exprimé leur difficulté à se positionner sur ce niveau de l'échelle d'évaluation.

Nous avons constaté qu'une sensation de « légère inconfort » ne signifie pas systématiquement que la pièce est inconfortable. En fait, ce ressenti correspond à une sensation passagère qui était liée à une situation ponctuelle particulière. C'est la raison pour laquelle nous décidons de comptabiliser les réponses « légèrement inconfortable » dans le total du taux de confort. Cela nous donne un taux de satisfaction de 64%. Le comparatif entre les taux de satisfaction (PPD) observés avec les enquêtes et avec les modélisations est présenté dans la figure 165 :

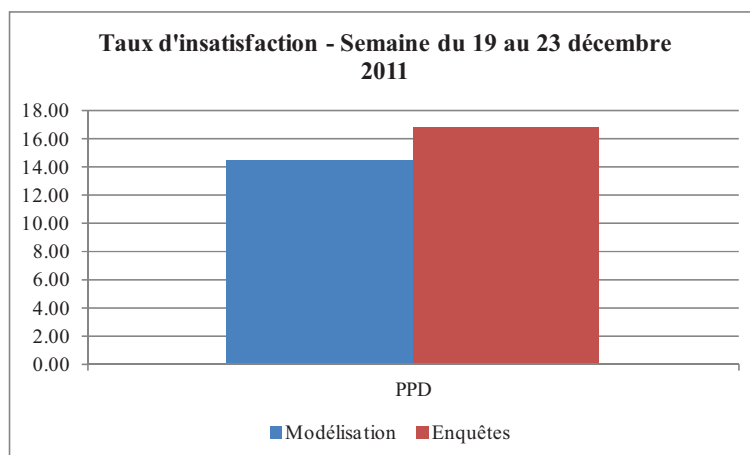


Figure 165. PPD - Semaine du 19 au 23 décembre

4.6 Conclusion

Nous avons présenté les résultats de la modélisation de la Tour Elithis. Nous avons observé des différences entre nos résultats et des explications ont été données mais des incertitudes sont toujours probables.

Dans la littérature il n'existe pas d'études qui permettent d'évaluer l'écart obtenu entre la modélisation et la réalité. Seulement quelques travaux ont été réalisés autour des incertitudes des outils des modélisations mais pas sur un cas bien précis.

Nous avons eu l'opportunité de travailler dans un bâtiment exemplaire au niveau énergétique. Nous avons récupéré des informations pour le travail de modélisation du bâtiment qui nous a permis de valider notre modèle.

Des problèmes ont été rencontrés lors du suivi du bâtiment, le nombre de données est très important et l'outil de gestion n'est pas 100% fonctionnel. Nous avons fait une comparaison sur deux semaines seulement, cela peut remettre en question nos résultats mais c'était la seule manière de pouvoir le faire.

Il serait intéressant de pouvoir réaliser le même travail sur une année entière, afin de pouvoir comparer la fiabilité de notre modèle d'une manière plus large. Notre objectif n'est pas de faire une analyse de la fiabilité des

modèles, mais de pouvoir définir un modèle assez fiable pour nous permettre de tester d'autres solutions et de démontrer leur intérêt.

Nous considérons, donc que notre modèle est fiable pour continuer nos études sur les stratégies de ventilation. Pour nos recherches nous allons modifier ce modèle pour pouvoir l'exploiter avec d'autres stratégies de ventilation, nous allons présenter ce travail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V.

ETUDE NUMÉRIQUE DE STRATÉGIES POUR L'AMÉLIORATION DE LA QEI DANS LES BÂTIMENTS DE BUREAUX À FAIBLE DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la modélisation numérique de la Tour Elithis en expliquant la démarche qui nous a conduit à la validation du modèle en termes de demande énergétique pour le chauffage et le rafraichissement.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les stratégies pour l'amélioration de la QEI dans les bâtiments de bureaux. Tout d'abord, nous définissons les critères de QEI et d'efficacité énergétique. Ensuite, nous présentons le modèle simplifié que nous avons utilisé pour l'analyse de ces stratégies. Enfin, nous présentons l'analyse réalisée ainsi que les résultats obtenus.

1. LES INDICATEURS DE PERFORMANCE

La performance énergétique d'un bâtiment n'est pas toujours synonyme de confort et de bonne qualité de l'air (santé). A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode bien définie pour analyser et intégrer ces trois aspects dans une démarche de conception globale optimisée d'un bâtiment. Notre objectif est de montrer les stratégies qui peuvent améliorer la performance globale d'un bâtiment.

La figure 166 présente les différents critères définissant la performance. Nous les avons divisés en 5 catégories à savoir QAI, confinement, confort hygrothermique, confort visuel et efficacité énergétique. Dans chaque catégorie nous retrouvons un ensemble de critères à respecter :

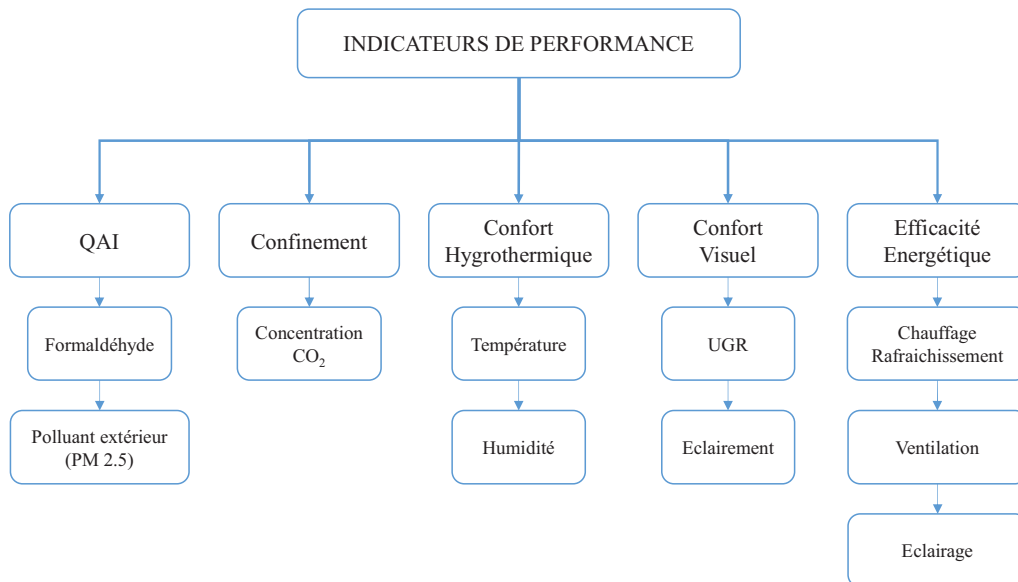


Figure 166. Indicateurs de performance

L'ensemble des critères, à l'exception de ceux qui concernent la demande énergétique, sont évalués sur une échelle de 0 à 1. Une valeur de 1 signifie que le critère est atteint. Quant à la demande d'énergie, nous faisons une comparaison avec la solution de référence. Si la demande énergétique de la variante proposée est plus élevée, la valeur du critère sera supérieure ou égale à 1, dans le cas contraire la valeur sera inférieure à 1.

1.1 Qualité de l'air intérieur

Pour étudier la qualité de l'air intérieur, trois critères d'évaluation sont proposés : la concentration en formaldéhyde avec des valeurs limites inférieures à $< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la concentration en formaldéhyde avec des valeurs limites inférieures à $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et la concentration en particules fines avec une valeur limite inférieure à $< 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (voir chapitre II).

En ce qui concerne le formaldéhyde, l'objectif est de déterminer les concentrations moyennes journalières qui sont en dessous des valeurs limites. L'indicateur est calculé comme la moyenne de ces valeurs. Par le biais de la simulation, nous déterminons la concentration moyenne par jour sur la période d'occupation. A partir de la méthode présentée dans le Chapitre IV, section 3.7.1, nous déterminons la concentration finale en fonction de la température. Ces valeurs permettront de déterminer le critère pour le formaldéhyde.

Pour les particules fines, nous procédons de la même manière. Nous déterminons une concentration moyenne par jour (période d'occupation) pour déterminer le nombre de valeurs qui se trouvent en-dessous de la valeur limite. L'indicateur est calculé comme la moyenne de ces valeurs (5 jours).

1.2 Confinement (Qualité du renouvellement d'air)

La notion de confinement est quantifiée par la mesure de concentration horaire en CO_2 . Notre cible correspond au niveau I de la norme NF 15250 à savoir 350 ppm au-dessus de la concentration extérieure. Dans notre cas, nous prenons la dernière valeur mesurée dans l'atmosphère, 400 ppm (Observatory, 2013), nous obtenons une valeur cible de 750 ppm.

Nous calculons la concentration horaire pendant la période d'occupation du bâtiment (7-19h). L'indicateur est calculé comme la moyenne du nombre de valeurs en dessous de 750 ppm (60 heures).

$$\text{Formaldéhyde} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de valeurs en dessous de 750 ppm}}{60}$$

1.3 Confort hygrothermique

L'évaluation du confort hygrométrique se base sur les températures et les humidités horaires observées pendant la durée d'occupation (7-19h). Pour déterminer le confort lié la température, nous calculons la température opérative à chaque heure. Nous calculons ensuite le nombre d'heures pour lequel la température se situe entre 21 e 23 °C (critère de confort, Chapitre II) et nous divisons cette valeur par le nombre total d'heures d'observation.

Équation 21. Indicateur température opérative

$$\text{Indicateur Confort Thermique} = \frac{\text{N}^\circ \text{ heures } (21 < T_{op} < 23^\circ\text{C})}{\text{N}^\circ \text{ heures total}}$$

Pour déterminer le confort lié à l'humidité, nous étudions ici deux critères : 12h et 24h (Voir Chapitre II). Comme pour le cas précédent, nous obtenons les valeurs d'humidité horaires. Pour le critère 24H, nous déterminons le nombre de valeurs qui se situent entre 40% et 60% pendant toute la semaine (120h). Pour le critère 12h, nous déterminons le nombre de valeurs qui se situent entre 40% et 60% pendant la durée d'occupation (60h). L'indicateur est calculé de la manière suivante :

Équation 22. Indicateur humidité intérieure

$$\text{Indicateur Confort Hygro} = \frac{\text{N}^\circ \text{ heures } (40\% < H\% < 60\%)}{\text{N}^\circ \text{ heures total (12 ou 60h)}}$$

1.4 Confort visuel.

Pour l'analyse du confort visuel nous avons étudié l'éclairement sur le plan de travail et le risque d'éblouissement (UGR) pour une personne placée face à la fenêtre. Pour cela, nous allons quantifier le nombre d'heures où l'éclairement est supérieur ou égal à 500 lux et le nombre d'heures où le risque d'éblouissement est inférieur ou égal à 19. L'indicateur est calculé comme suit :

Équation 23. Indicateur éclairage – confort visuel

$$\text{Indicateur Confort Visuel – Lux} = \frac{\text{N}^\circ \text{ heures Lux } \geq 500}{\text{N}^\circ \text{ total d'heures (12h)}}$$

$$\text{Indicateur Confort Visuel – UGR} = \frac{\text{N}^\circ \text{ heures UGR } \leq 19}{\text{N}^\circ \text{ total d'heures (12h)}}$$

1.5 Efficacité énergétique

Afin d'évaluer l'impact énergétique, nous avons défini quatre types de demande :

1. Demande liée au chauffage. Pour celle-ci, nous tenons compte du système principal de chauffage du bâtiment (poutres climatiques) ainsi que de la récupération de la chaleur sur l'air extrait quand fait par l'échangeur quand celui-ci est en fonctionnement.

2. Demande liée au rafraîchissement
3. Demande liée à la ventilation
4. Demande liée à l'éclairage

L'indicateur énergétique est obtenu en faisant le ratio entre la demande de la solution de référence et celle de la variante.

Équation 24. Indicateur performance énergétique

$$\text{Indicateur Énergétique} = \frac{\text{Demande totale}}{\text{Demande solution base}}$$

L'indicateur de ce critère peut être supérieur à 1 quand la demande de la variante est plus importante que celle de la référence. La variante ne sera donc pas intéressante d'un point du vue énergétique.

2. LES STRATEGIES DE PERFORMANCE DANS UN BÂTIMENT TERTIAIRE DE BUREAUX

Compte tenu des résultats observés dans le chapitre III, nous avons défini 5 stratégies de performance (figure 167). Elles permettent d'évaluer le bâtiment de façon générale en se focalisant sur la QEI.

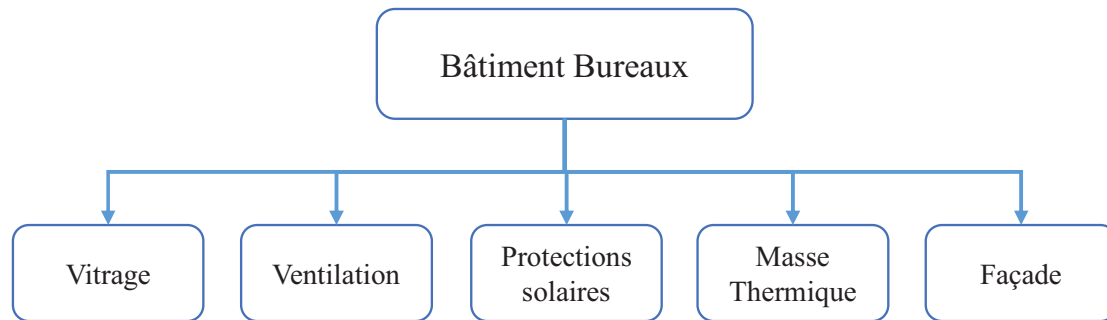


Figure 167. Les stratégies de performance

Tout d'abord, nous avons le vitrage. La Tour Elithis se caractérise par l'existence d'une surface vitrée très importante. La modification des caractéristiques des vitrages peut permettre d'améliorer le confort et de diminuer la demande énergétique. Nous avons vu, dans le bilan énergétique (Chapitre III), que ce poste représente une part importante dans le bilan énergétique globale du bâtiment.

Nous avons ensuite la ventilation qui constitue le moyen le plus utilisé pour traiter la QAI. En revanche, l'impact énergétique de ce paramètre est loin d'être négligeable. Nous verrons comment il est possible d'améliorer la QAI et le confort sans impacter de manière importante l'efficacité énergétique d'un bâtiment. La masse thermique est un paramètre qui permet d'améliorer le confort d'été tout en optimisant la demande en froid. Nous étudierons la mesure dans laquelle celui-ci peut améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

Enfin, nous avons la façade. D'une manière générale, elle constitue la partie la plus importante d'un bâtiment. Nous verrons les différentes options qui peuvent s'incorporer à la façade du bâtiment qui vont permettre d'améliorer le confort, notamment la QAI tout en diminuant la demande énergétique.

Pour chacune des stratégies testées, nous avons analysé les résultats avec les indicateurs de performance précédemment définis. Nous comparons chaque solution proposée avec la solution de base. Le tableau suivant récapitule la définition des stratégies que nous avons étudiées.

Tableau 46. Détail stratégies de performance

		SEMAINE D'HIVER	SEMAINE D'ETE
CONCEPTION BÂTIMENT	1	Type de vitrage	Type de vitrage
	2	Recyclage réglementaire	-
VENTILATION	3	Ventilation continu 7-19h	Ventilation 7-19h
	4	Ventilation 5-19h	Ventilation 5-19h
	5	Ventilation Nocturne 19-5h	Sur-ventilation Naturelle Nocturne 19-5h
	6	Ventilation 36 m³/h personne	Ventilation 50 m³/h personne
	7	Ventilation Naturelle	Ventilation Naturelle
PROTECTIONS SOLAIRES	8	Bouclier Solaire (Elithis)	Bouclier Solaire (Elithis)
	9	Brises Soleil Orientables	Brises Soleil Orientables
	10	Verre Electrochrome	Verre Electrochrome

INERTIE	11	MCP plafond	MCP plafond
	12	Béton plafond	Béton plafond
ENVELOPPE	13	Double Peau	Double Peau
	14	Mur Trombe	Mur Trombe
	15	Mur Trombe Actif	Mur Trombe Actif
	16	Fenêtre Parieto-dynamique	Fenêtre Parieto-dynamique

3. PRESENTATION DU MODELE D'ETUDE

Notre modèle de base comporte quelques différences par rapport au modèle que nous avons présenté dans le chapitre IV. Nous avons fait une analyse des paramètres que nous avons considérés importants pour la définition du modèle d'étude pour l'analyse de stratégies. L'objectif de ce travail est de définir quelles seraient les stratégies de ventilation à mettre en place dans un bâtiment de bureaux pour améliorer son efficacité, le confort thermique et la qualité de l'air. Le modèle d'analyse doit être représentatif des bâtiments de bureaux existants, en France. Notre travail est fait autour de la Tour Elithis qui comporte des particularités qui doivent être abordées avec attention :

1. Le quartier
2. Le bouclier thermique
3. Les infiltrations
4. Les sondes d'éclairage

Nous avons constaté, dans le chapitre IV la fiabilité de notre modèle de la Tour Elithis. Cela nous a permis d'avancer dans notre recherche mais il est important de rappeler que dans la plupart de travaux réalisés au laboratoire et en modélisation nous avons observé et continuerons à observer des différences avec la réalité ?. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre la modélisation et le suivi réel.

Nous allons maintenant présenter les observations que nous avons faites sur le bâtiment et qui nous ont permis de définir un modèle plus général pour notre recherche car, comme nous l'avons déjà dit, la Tour Elithis est un bâtiment unique et difficilement reproductible à l'identique. D'où l'importance de pouvoir définir un modèle de bâtiment de bureaux plus standard.

3.1 Facteurs qui influencent la performance du bâtiment

3.1.1 Le quartier

L'emplacement de la tour Elithis est très particulier. Elle est entourée des bâtiments qui ont un impact direct sur sa demande énergétique. Pour nos analyses, il est important d'avoir un modèle qui puisse s'extrapoler à d'autres cas. Nous avons observé que les caractéristiques du quartier avaient un rôle important sur la demande énergétique. Nous avons donc cherché à mieux comprendre ce rôle du quartier sur le modèle. La question que nous nous sommes posée est : si ce bâtiment était reproduit demain à un endroit différent, ses performances seraient-elles identiques ? Pour cela, nous avons estimé la demande énergétique du 4^{ème} étage avec et sans prise en compte du quartier. Le tableau 47 montre les résultats obtenus :

Tableau 47. Comparatif besoins chauds et froids - Quartier

BESOINS CHAUDS [kWh/m²]			BESOINS FROIDS [kWh/m²]		
	Avec voisinage	Sans voisinage		Avec voisinage	Sans voisinage
Lundi	0.283	0.242	Lundi	0.070	0.268
Mardi	0.238	0.220	Mardi	0.032	0.181
Mercredi	0.203	0.192	Mercredi	0.039	0.184
Jeudi	0.112	0.101	Jeudi	0.059	0.195
Vendredi	0.074	0.052	Vendredi	0.041	0.186
TOTAL	0.910	0.807	TOTAL	0.242	1.014
		-12.76%			76.14%

En hiver, le fait de ne pas avoir les bâtiments autour, diminue la demande en chauffage de 12%. Cela s'explique par le fait que le bâtiment est plus exposé au rayonnement solaire. En été, la demande de froid est plus

importante lorsque les bâtiments autour ne sont pas pris en compte, tout en conservant le bouclier thermique. Cette demande est 76% supérieure. L'importance des bâtiments environnants notamment de celui situé à l'Ouest est avérée. .

Tableau 48. Comparatif besoins éclairage - Quartier

BESOINS ECLAIRAGE [kWh/m²] - HIVER			BESOINS ECLAIRAGE [kWh/m²] - ÉTÉ		
	Avec voisinage	Sans voisinage		Avec voisinage	Sans voisinage
Lundi	0.008	0.007	Lundi	0.005	0.004
Mardi	0.010	0.009	Mardi	0.005	0.004
Mercredi	0.011	0.010	Mercredi	0.005	0.004
Jeudi	0.009	0.008	Jeudi	0.005	0.004
Vendredi	0.009	0.008	Vendredi	0.005	0.004
TOTAL	0.047	0.041	TOTAL	0.026	0.019
		-13.78%			-38.52%

En ce qui concerne la demande d'éclairage, nous avons observé une diminution de la demande d'environ 13% pour la semaine d'hiver et 38% pour la semaine d'été. L'impact du quartier est donc négatif d'un point de vue de consommations par l'éclairage artificiel. Après analyse, nous décidons de ne pas prendre en compte le quartier dans notre modèle d'étude. Cela nous permettra d'avoir une approche plus réaliste vis-à-vis des bâtiments de bureaux classique.

3.1.2 Le Bouclier

Nous avons étudié précédemment l'influence du quartier sur la demande énergétique du bâtiment tout en conservant le bouclier inchangé. Afin d'évaluer l'impact réel de celui-ci, nous avons modifié sa configuration. Dans les figures 168, 169 et 170, nous pouvons observer les modifications apportées au bouclier :

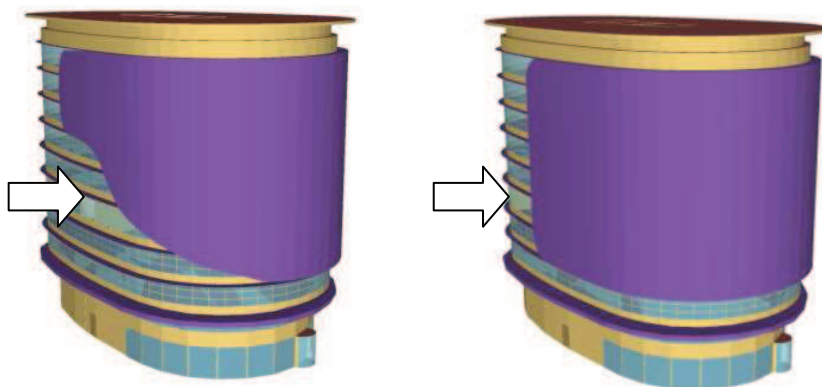


Figure 168. Tour Elithis ouest - Bouclier avant / après

Côté Ouest, la proximité du bâtiment voisin avait défini la forme du bouclier. Nous avons compensé cette différence en comblant cette partie manquante.

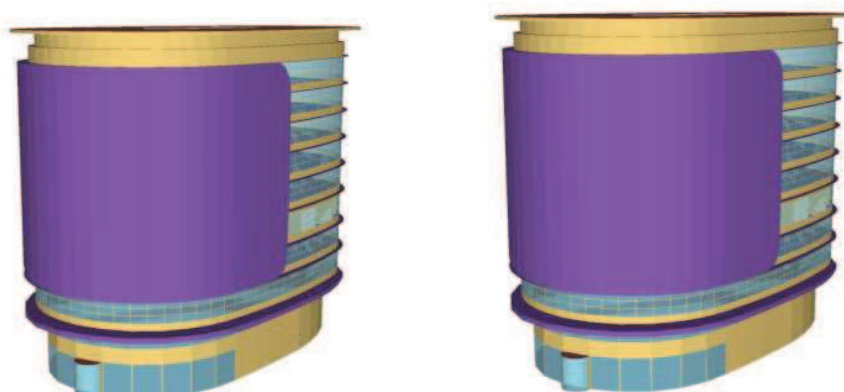


Figure 169. Tour Elithis est - Bouclier avant / après

A l'Est, nous n'avons pas modifié la forme du bouclier puisque elle avait déjà été conçue pour protéger le bâtiment sur toute la hauteur.

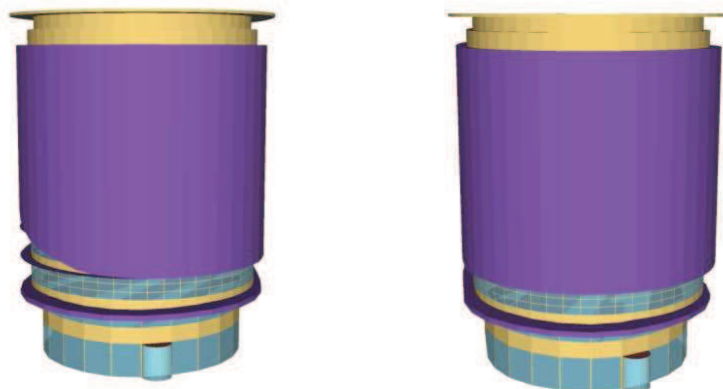


Figure 170. Tour Elithis - Bouclier avant / après

Au Sud, le seul changement qui a été apporté se trouve à gauche en partie basse.

A la suite de ces modifications, nous avons modélisé à nouveau le bâtiment. Les résultats sont présentés dans le tableau 49 et 50 :

Tableau 49. Distribution de besoins chauds et froids - Bouclier

BESOINS CHAUDS			BESOINS FROIDS		
Sans voisinage			Sans voisinage		
	Bouclier base	Bouclier modifié		Bouclier base	Bouclier modifié
Lundi	0.283	0.249	Lundi	0.070	0.204
Mardi	0.238	0.223	Mardi	0.032	0.131
Mercredi	0.203	0.194	Mercredi	0.039	0.137
Jeudi	0.112	0.103	Jeudi	0.059	0.143
Vendredi	0.074	0.056	Vendredi	0.041	0.140
TOTAL	0.910	0.826	TOTAL	0.242	0.755
		-10.13%			67.96%

En hiver, la modification apportée au bouclier permet de diminuer de 10% la demande en chauffage. Dans le cas précédent (impact du quartier) la diminution était de 12%. L'écart obtenu n'est pas considérable. La trajectoire du soleil étant plus basse en hiver, le bouclier a peu d'impact sur la consommation de chauffage. L'impact du bouclier est bien plus important en été avec une augmentation de la demande en froid de 67% contre 76% dans le cas précédent (sans modification du bouclier).

Quant à la demande d'éclairage artificiel, les résultats sont les suivants :

Tableau 50. Distribution de besoins d'éclairage - Bouclier

BESOINS ECLAIRAGE [kWh/m²] - HIVER			BESOINS ECLAIRAGE [kWh/m²] - ÉTÉ		
	Bouclier base	Bouclier modifié	Avec voisinage	Sans voisinage	
Lundi	0.008	0.007	Lundi	0.005	0.004
Mardi	0.010	0.009	Mardi	0.005	0.004
Mercredi	0.011	0.010	Mercredi	0.005	0.004
Jeudi	0.009	0.008	Jeudi	0.005	0.004
Vendredi	0.009	0.008	Vendredi	0.005	0.004
TOTAL	0.047	0.042	TOTAL	0.026	0.019
		-10.84%			-35.95%

Nous pouvons observer un impact mais qui est plus faible que dans le cas précédent : 10% contre 13% pour le cas hiver et 38% contre 35% pour le cas été.

Suite à l'analyse de l'impact du bouclier, nous décidons de conserver les modifications apportées à celui-ci pour la suite de notre travail.

3.1.3 Infiltration

Le niveau d'infiltration de la Tour Elithis est de 0.4 vol/h pour les conditions normales de vent (delta de pression de 4 Pa et vitesse de vent d'environ 2.5 m/s). Nous considérons que ce débit d'infiltration est important. Nous avons observé une surconsommation de chauffage qui peut s'expliquer, en partie, par les infiltrations (voir Bilan énergétique de la Tour Elithis). Nous avons décidé de modéliser le bâtiment sans et avec les infiltrations pour connaître leur impact. Les résultats de cette modélisation sont présentés dans le tableau 51 :

Tableau 51. Distributions de besoins en fonction de l'infiltration

BESOINS CHAUDS			BESOINS FROIDS		
	Avec infiltrations	Sans infiltrations		Avec infiltrations	Sans infiltrations
Lundi	0.249	0.139	Lundi	0.204	0.240
Mardi	0.223	0.101	Mardi	0.131	0.163
Mercredi	0.194	0.088	Mercredi	0.137	0.163
Jeudi	0.103	0.048	Jeudi	0.143	0.172
Vendredi	0.056	0.014	Vendredi	0.140	0.176
TOTAL	0.826	0.391	TOTAL	0.755	0.914
		52.68%			21.07%

Pour les besoins en chaud, la suppression des infiltrations a permis de diminuer la demande en chauffage de 52%. En revanche, pour la semaine d'été, la demande en froid a augmenté de 21%. L'étanchéité à l'air du bâtiment joue un rôle important tant sur l'efficacité énergétique que sur la qualité de l'air du bâtiment. La bonne maîtrise des débits dits « parasites » reste importante mais elle doit se faire tout en optimisant les débits et le fonctionnement de la ventilation. Les débits d'air parasites contribuent d'une certaine manière à améliorer la qualité de l'air intérieur puisque le taux de renouvellement d'air est plus important. En revanche, ces débits amènent aussi une pollution extérieure. Lors de l'analyse que nous avons faite de la qualité de l'air du bâtiment, nous avons pu constater les différences observées entre la ventilation double et simple flux. Dans tous les cas la maîtrise des débits d'infiltration est déterminante pour l'optimisation des systèmes de ventilation et de ce fait pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

Nous décidons de ne pas prendre en compte les infiltrations dans notre modèle. Nous considérons que la maîtrise de l'infiltration est de plus en plus aisée. Les bâtiments de demain et même ceux d'aujourd'hui sont de plus en plus étanches.

3.1.4 Sonde de calcul de l'éclairage

Un autre élément que nous avons étudié et qui a son importance dans le modèle de calcul est l'éclairage. La modélisation de ce paramètre a été faite par une sonde de détection de l'éclairage au niveau du plafond. Ce positionnement de la sonde n'est pas optimal car l'éclairage doit être mesuré et assuré au niveau du plan de travail. Un mauvais emplacement des sondes peut occasionner une surconsommation d'éclairage et un mauvais confort visuel.

Nous avons voulu mettre en évidence l'impact du positionnement des sondes de calcul d'éclairage. Une première modélisation tient compte des sondes au niveau du plafond. La deuxième modélisation considère les sondes placées à hauteur du plan de travail. Dans le tableau 52, nous présentons les résultats de ces deux simulations :

Tableau 52. Distribution de l'éclairage en fonction de la sonde

	Plafond		Table bureau	
	LUX TOTAL	N° h > 500 Lux	LUX TOTAL	N° h > 500 Lux
Lundi	35 098	17	134 431	68
Mardi	6 590	0	32 350	16
Mercredi	3 914	0	19 337	0
Jeudi	33 158	11	110 262	48
Vendredi	22 213	7	82 475	53
TOTAL	100 972	35	378 855	185

La quantité de lumière reçue sur le plan de travail est bien plus importante, car la sonde est placée près de la surface à traiter. Cette implantation de la sonde peut permettre d'optimiser la gestion de l'éclairage de façon à mieux maîtriser la consommation de ce poste.

Pour la suite de notre travail, nous décidons de placer les sondes de détection au niveau des plans de travail.

3.2 Modèle d'étude

Pour nos modélisations nous avons construit un modèle en fonction des paramètres que nous avons analysés précédemment. Notre objectif est d'avoir un modèle simplifié et réaliste du bâtiment pour pouvoir tester différentes solutions qui vont nous permettre d'améliorer le confort thermique, la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique du bâtiment. Ce modèle reprend à l'identique l'architecture de la Tour Elithis. Nous avons simplement modifié quelques paramètres pour les rapprocher autant que possible aux caractéristiques des bâtiments de bureaux classiques. Nous allons tester différents principes de ventilation dans un modèle qui va nous donner une vision plus générale d'un bâtiment de bureaux.

4. ANALYSE DU MODÈLE DE REFERENCE – INDICATEURS DE PERFORMANCE

Avant de présenter les résultats des stratégies, nous allons montrer les résultats obtenus avec les indicateurs de performance sur notre modèle de base, l'objectif est de regarder le niveau de performance du bâtiment vis-à-vis de nos indicateurs.

4.1 Analyse de modèle de référence

Semaine d'hiver

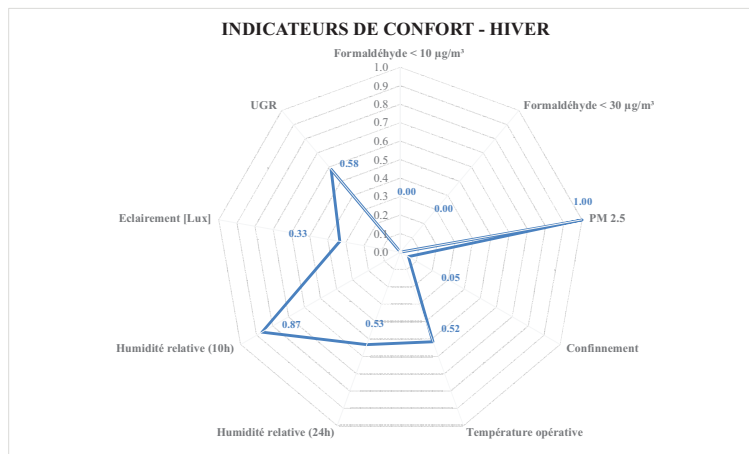


Figure 171. Indicateurs de performance – Modèle de référence (cas hiver)

Au niveau des indicateurs de performance dans le modèle de référence, seulement deux indicateurs sont intéressants, les particules et l'humidité 10h. Le confort de manière générale dans le bâtiment peut être considéré comme moyen, les résultats en termes de confort thermique et visuel ne sont pas très satisfaisants 0.52 et 0.58. La qualité de l'air du bâtiment est mauvaise d'après nos simulations.

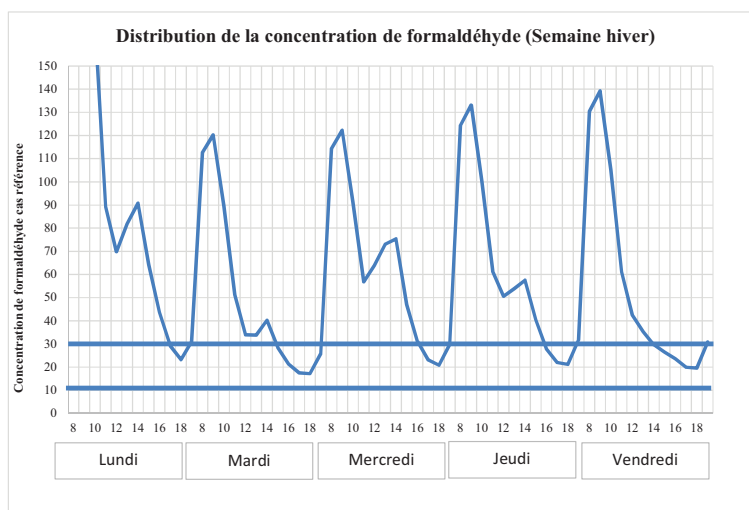


Figure 172. Distribution des concentrations de formaldéhyde – Modèle de référence (cas hiver)

Au niveau de la QAI, nous pouvons constater que les concentrations ne sont jamais en dessous de 10 µg/m³. Seulement à certains moments nous pouvons observer des concentrations en dessous de 30 µg/m³ notamment en fin de journée. Le mode de ventilation qui a été utilisé à l'époque, recyclage, ne permet pas de garantir une bonne qualité de l'air vis-à-vis du formaldéhyde. L'absence d'infiltrations et l'arrêt du système de ventilation la nuit ne permet pas non plus un bon brassage de l'air et une évacuation des polluants, d'où l'évolution des concentrations la nuit. Le lundi, par exemple, la concentration de formaldéhyde atteint des valeurs très élevées, > 100 µg/m³, nous pouvons observer une diminution de la concentration seulement après 14h.

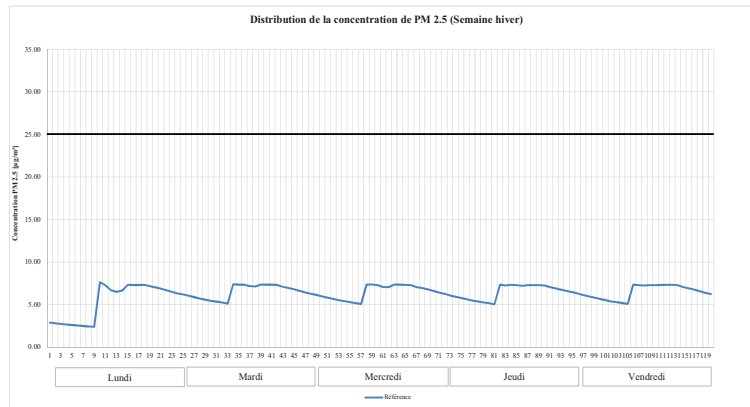


Figure 173. Distribution PM 2.5 – Modèle de référence (cas hiver)

Au niveau des particules fines, les concentrations sont très faibles, le recyclage ainsi que l'absence d'infiltrations permettent de garantir une bonne qualité de l'air vis-à-vis des particules fines.

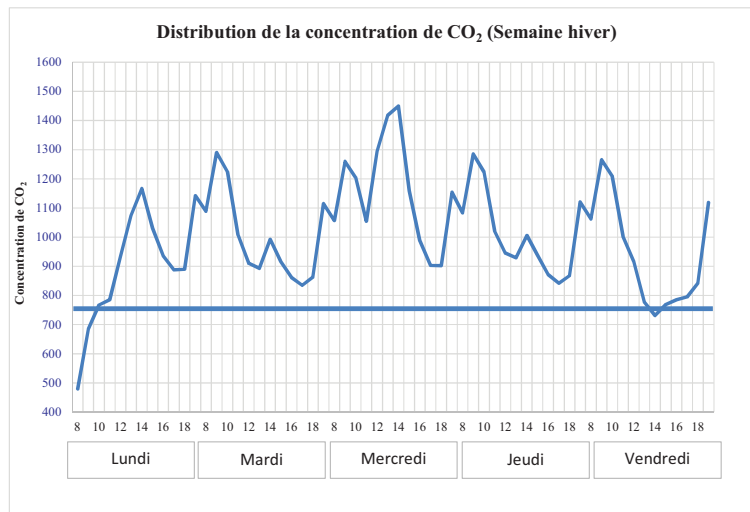


Figure 174. Distribution CO₂ – Modèle de référence (cas hiver)

Au niveau de la qualité globale de la ventilation, les concentrations en CO₂ observées sont assez élevées, dépassant souvent les 1000 ppm. Notre objectif d'être en dessous de 750 ppm n'est atteint que sur quelques heures. Le CO₂ dépend fortement de l'occupation, dans notre cas, le taux d'occupation est assez faible, au total 18 personnes occupent cet étage, ce qui nous donne un ratio de 27 m² par personne. Dans le cas où l'occupation serait plus importante, les concentrations de CO₂ risqueraient d'être très élevées. Le renouvellement d'air semble ici insuffisant.

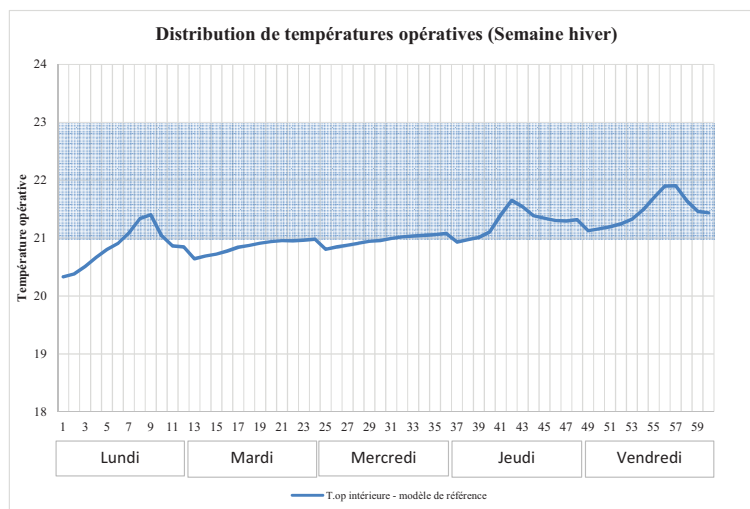


Figure 175. Distribution des températures opératives – Modèle de référence (cas hiver)

Au niveau des températures, les valeurs sont très faibles et cela malgré une température de consigne de 22°C. En début de semaine, nous pouvons observer des températures assez faibles qui sont liées aux valeurs extérieures, le faible niveau de confort s'explique par les températures de surface, notamment celle des vitrages.

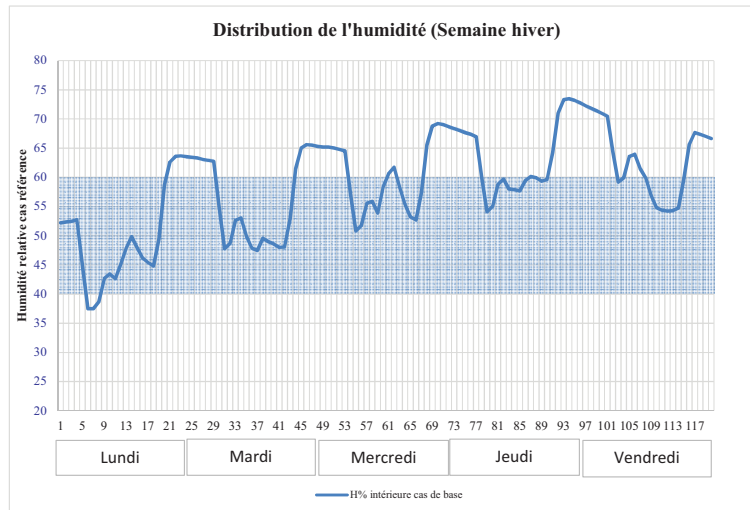


Figure 176. Distribution de l'humidité – Modèle de référence (hiver)

Par rapport à l'humidité, pendant les heures d'occupation (7-19h) nous pouvons observer que les valeurs restent entre 40 et 60% la plupart du temps. La nuit en revanche, l'absence de la ventilation et d'infiltrations empêchent le renouvellement d'air et le taux d'humidité augmente rapidement.

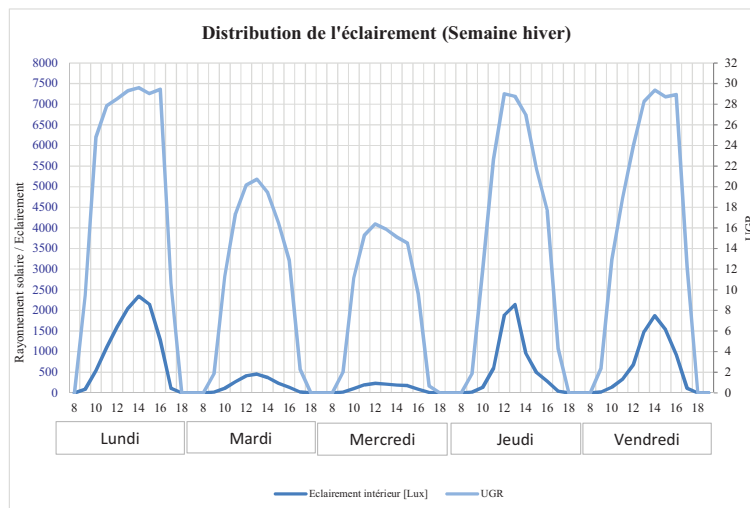


Figure 177. Distribution de l'éclairement – Modèle de référence (hiver)

Au niveau de l'éclairement (courbe bleu foncé) il dépend de l'ensoleillement extérieur, le lundi, le jeudi et le vendredi, nous pouvons observer un éclairement très important. Au niveau du confort visuel (courbe bleu clair), les valeurs dépassent souvent un UGR de 19. L'ensoleillement plus important induit un éclairement élevé, le bouclier solaire permet au bâtiment de bénéficier d'un apport solaire plus important mais le confort visuel des occupants est pénalisé.

- Semaine d'été

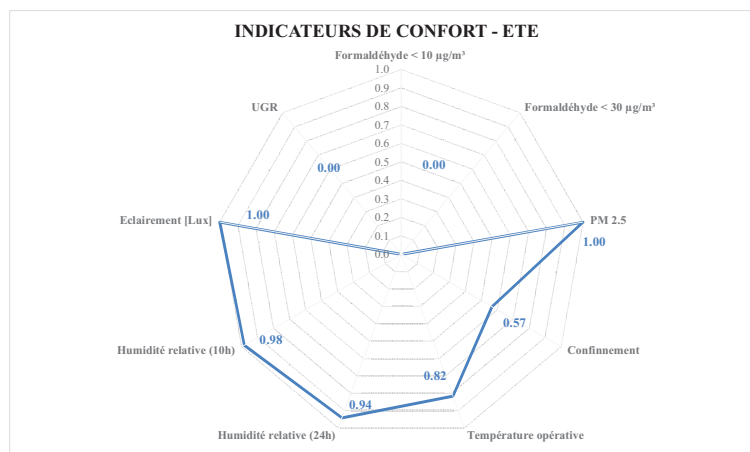


Figure 178. Indicateurs de performance – Modèle de référence (cas été)

Les résultats de la simulation de la semaine d'été sont plus intéressants. A la différence du cas hiver, nous observons une amélioration du confort hygrothermique, de la ventilation et de l'éclairage. La température de consigne utilisée, 24°C, explique en partie ces résultats.

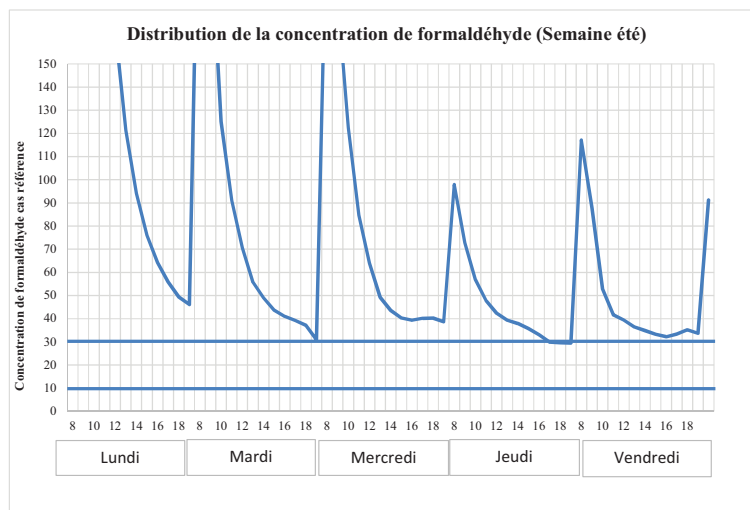


Figure 179. Distribution des concentrations de formaldéhyde – Modèle de référence (été)

Le faible taux de renouvellement d'air joue directement sur la concentration de formaldéhyde. En été la concentration est plus importante du fait de la température. Dans le cas présenté nous n'observons pas de valeurs inférieures à 30 µg/m³ à la différence du cas hiver..

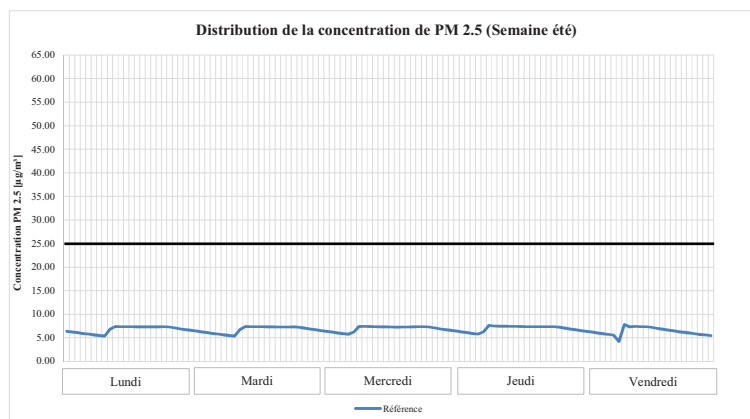


Figure 180. Distribution concentration PM 2.5 – Modèle de référence (cas été)

Le mode de fonctionnement de la ventilation en été est le double flux en tout air neuf. Les concentrations en PM 2.5 sont constantes pendant le fonctionnement de la ventilation et ont les mêmes valeurs pendant la journée, grâce à la filtration associée au fonctionnement du double flux.

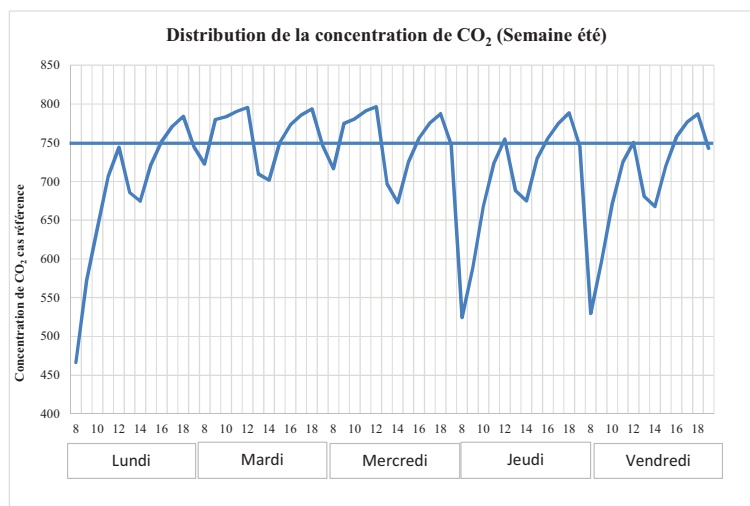


Figure 181. Distribution CO₂ – Modèle de référence (cas été)

Avec le mode de fonctionnement tout air neuf, les concentrations de CO₂ diminuent considérablement. De manière générale nous observons une distribution assez homogène des valeurs, même si l'objectif n'est pas atteint la concentration moyenne est assez faible. En revanche le taux d'occupation de cet étage est de 27 m²/personne ce qui favorise les résultats.

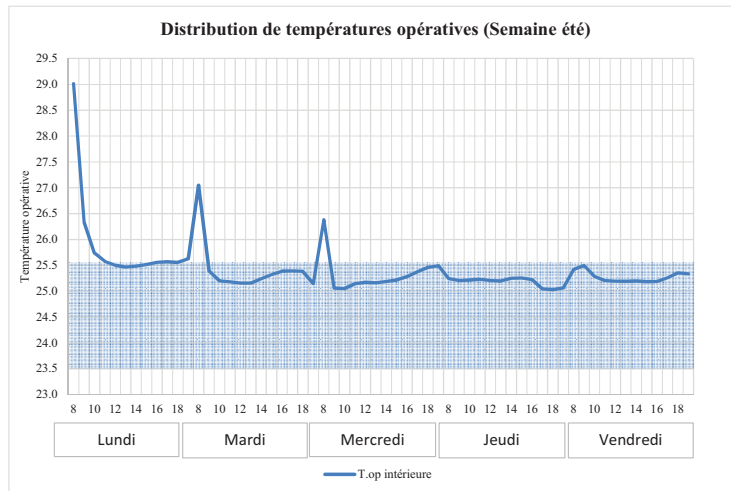


Figure 182. Distribution des températures – Modèle de référence (cas été)

Au niveau des températures opératives, elles sont dans la limite de la zone de confort mais cela nécessite une température de consigne de 24°C contrairement à ce qui est préconisé dans les normes, 26°C.

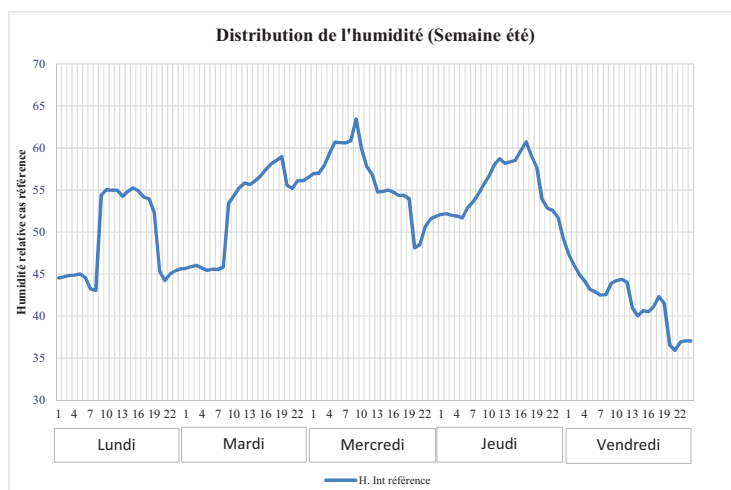


Figure 183. Distribution de l'humidité relative intérieure – Modèle de référence (cas été)

En ce qui concerne l'humidité relative, pendant les heures de travail nous pouvons observer une évolution des valeurs, les températures plus élevées modifient le métabolisme des occupants, la chaleur latente augmente. En revanche la nuit les concentrations diminuent.

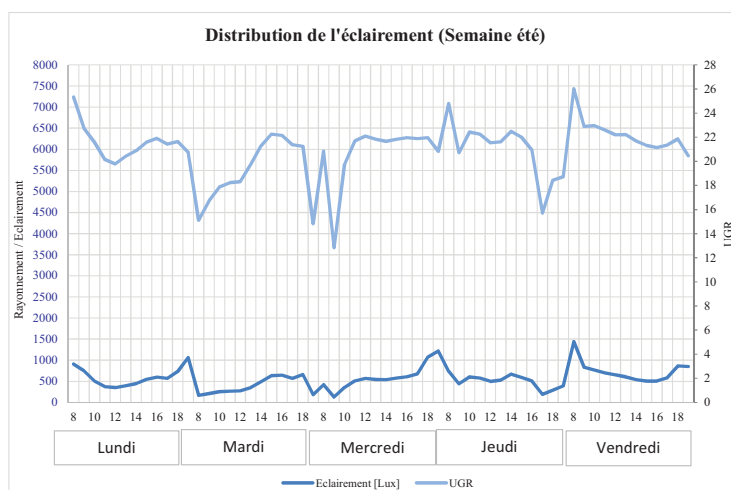


Figure 184. Distribution de l'éclairage et l'UGR – Modèle de référence (cas été)

L'ensoleillement est plus important pendant cette période favorisant l'éclairage naturel, en revanche le risque d'éblouissement est plus important, les valeurs observées se situent autour de 28, le confort visuel n'est pas satisfaisant.

4.2 Demande énergétique

Au niveau de la demande énergétique voici les résultats :

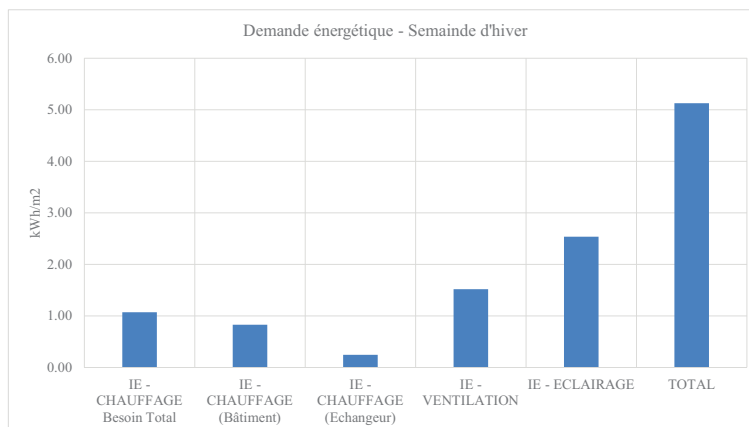


Figure 185. Demande énergétique – Semaine d'hiver

Les valeurs présentées sont utilisées comme référence pour l'analyse des stratégies de performance. Au niveau du chauffage, deux critères sont analysés (bâtiment et échangeur), nous observons la part de chauffage pour le bâtiment et la part qui est récupérée par l'échangeur. La somme correspond à la demande totale de chauffage.

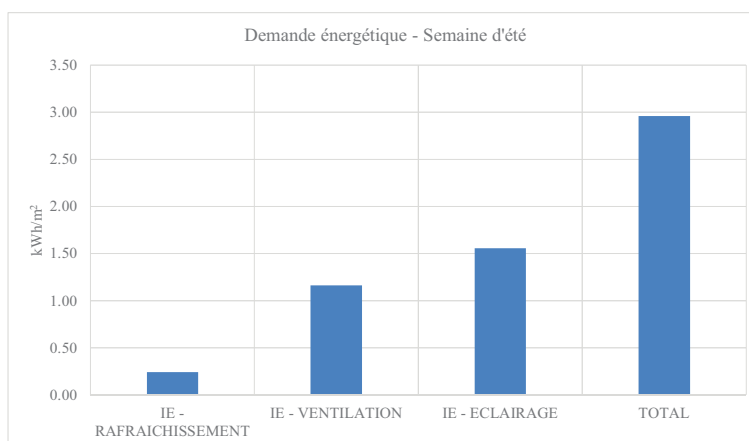


Figure 186. Demande énergétique – Semaine d'été

Les valeurs présentées correspondent à la demande énergétique pendant la semaine d'été. Elles seront comparées aux autres variantes pour déterminer l'indicateur. Nous pouvons observer que la demande en froid est très faible par rapport à la ventilation et à l'éclairage.

4.3 Conclusion

Nous avons observé les résultats obtenus sur notre modèle de référence. Ce bâtiment affiche une consommation faible qui permet de le classer comme un bâtiment performant mais par rapport à la Qualité des Environnements intérieurs (QEI) nous n'observons pas le même résultat. La température de consigne utilisée est différente par rapport à la réglementation (22°C pour le chauffage contre 19°C et 24°C pour le rafraîchissement contre 26°C). Les conséquences sont une augmentation de la demande énergétique, notamment pour le chauffage, d'ailleurs dans le bilan de la Tour nous avons observé une augmentation de la demande d'année en année. Cette modification de la température de consigne avait comme objectif d'améliorer le confort dans le bâtiment. Nous allons évaluer par la suite les différentes stratégies qui permettront de réduire la demande tout en optimisant le confort.

5. ANALYSE DES STRATEGIES D'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE

5.1 Vitrage

Ce bâtiment est conçu avec une surface vitrée très importante. Les caractéristiques des vitrages sont assez performantes, ce qui permet de réduire considérablement la demande en froid. En revanche, dans le bilan du bâtiment (Chapitre III), nous avons observé que le chauffage représente actuellement une part importante, du fait de l'amélioration du confort.

Nous proposons dans cette variante une modification de caractéristiques de vitrages. L'objectif est d'améliorer le confort et de diminuer la demande en chaud. Les caractéristiques du nouveau vitrage sont les suivantes :

Tableau 53. Caractéristiques des vitrages

Description	U [W/m² K]	g	Tl
Vitrage – cas de base	1.1	0.43	0.71
Vitrage variante	1.1	0.61	0.8

Indicateurs QEI – Semaine d'hiver

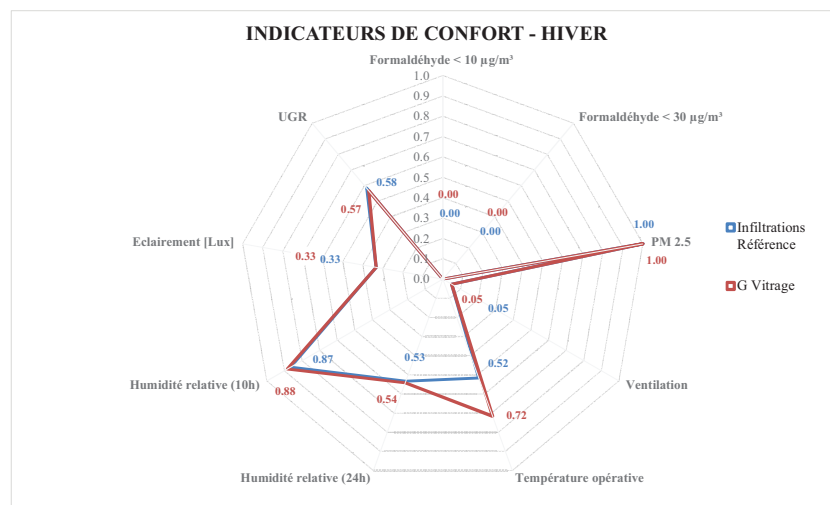


Figure 187. Indicateurs QEI variante 1 – Cas hiver

Seul l'indicateur du confort thermique présente une évolution par rapport au cas de référence. Les apports solaires sont plus importants ce qui a permis d'améliorer le confort thermique.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

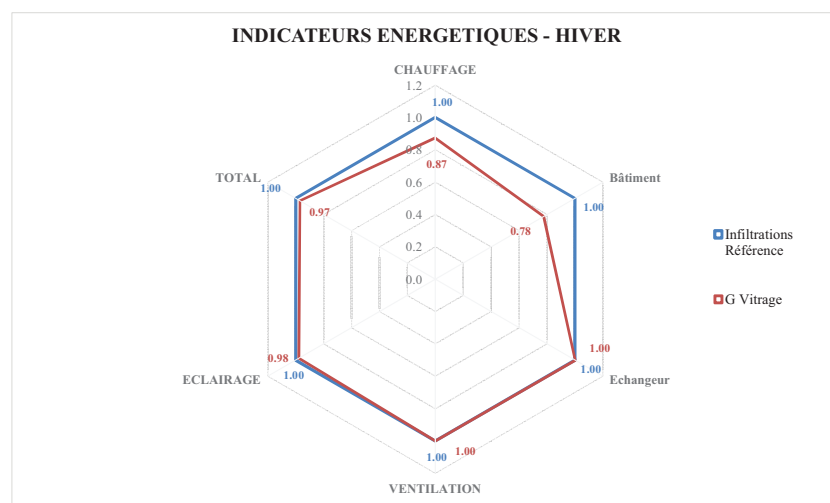


Figure 188. Indicateurs énergétiques variante 1 – Cas hiver

La modification du vitrage a permis de réduire la demande de chauffage de manière considérable, le bâtiment est mieux chauffé. Au niveau de la demande pour l'éclairage nous pouvons observer un gain, qui est moins intéressant que pour le chauffage.

- Indicateur QEI – Semaine d’été

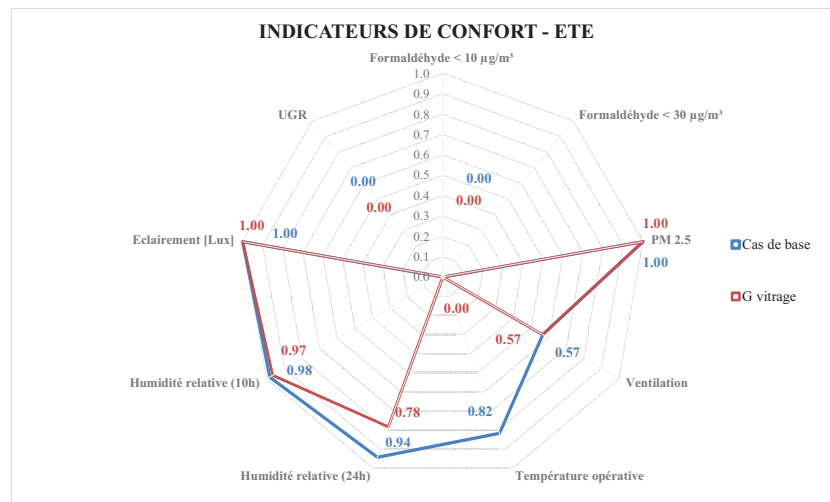


Figure 189. Indicateurs QEI variante 1 – Cas été

Cette solution modifié considérablement les apports solaires, ce qui se traduit par un mauvais confort d’été.

Indicateurs énergétiques – semaine été

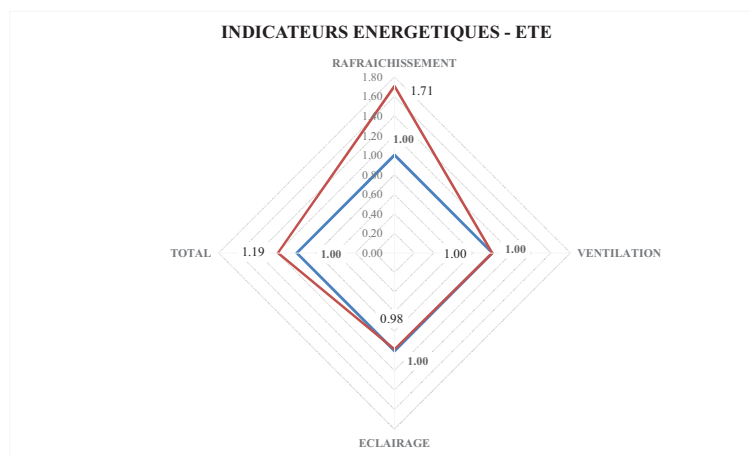


Figure 190. Indicateurs énergétiques variante 1 – Cas été

L’indicateur pour cette variante est de 1.71. La demande énergétique est plus importante que pour la solution de référence (71%). Au niveau de l’éclairage une légère diminution est observée (1.00 à 0.98) mais elle n’est pas importante puisque le taux de transmission lumineuse n’a pas subi une modification importante. De manière générale nous observons une augmentation de la demande totale d’environ 19% (1.19)

Conclusion

Nous avons observé que la modification des caractéristiques de vitrage permet d’améliorer le confort thermique et d’humidité tout en diminuant la demande liée au chauffage et à l’éclairage. Le confort visuel est légèrement impacté.

Pour un fonctionnement en été, cette modification ne s’avère pas intéressante du fait des apports solaires plus importants. Cette solution peut être combinée avec d’autres types de protections solaires qui permettent de contrôler les apports solaires, l’efficacité peut être optimisée. Dans les climats avec des hivers plus rigoureux, les caractéristiques du vitrage doivent être étudiées avec attention.

5.2 Ventilation

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus avec les variantes suivantes :

- Recyclage
- Ventilation 7-19h en tout air neuf
- Ventilation 5-19h en tout air neuf
- Ventilation nocturne
- Modulation de débits
- Ventilation naturelle

5.2.1 Recyclage

Cette variante a été modélisée seulement dans le cas hivernal, puisque le recyclage est une solution qui permet de chauffer les bâtiments plus rapidement.

Description de la variante

Le scenario de fonctionnement de la Tour Elithis pendant la période hiver est le suivant :

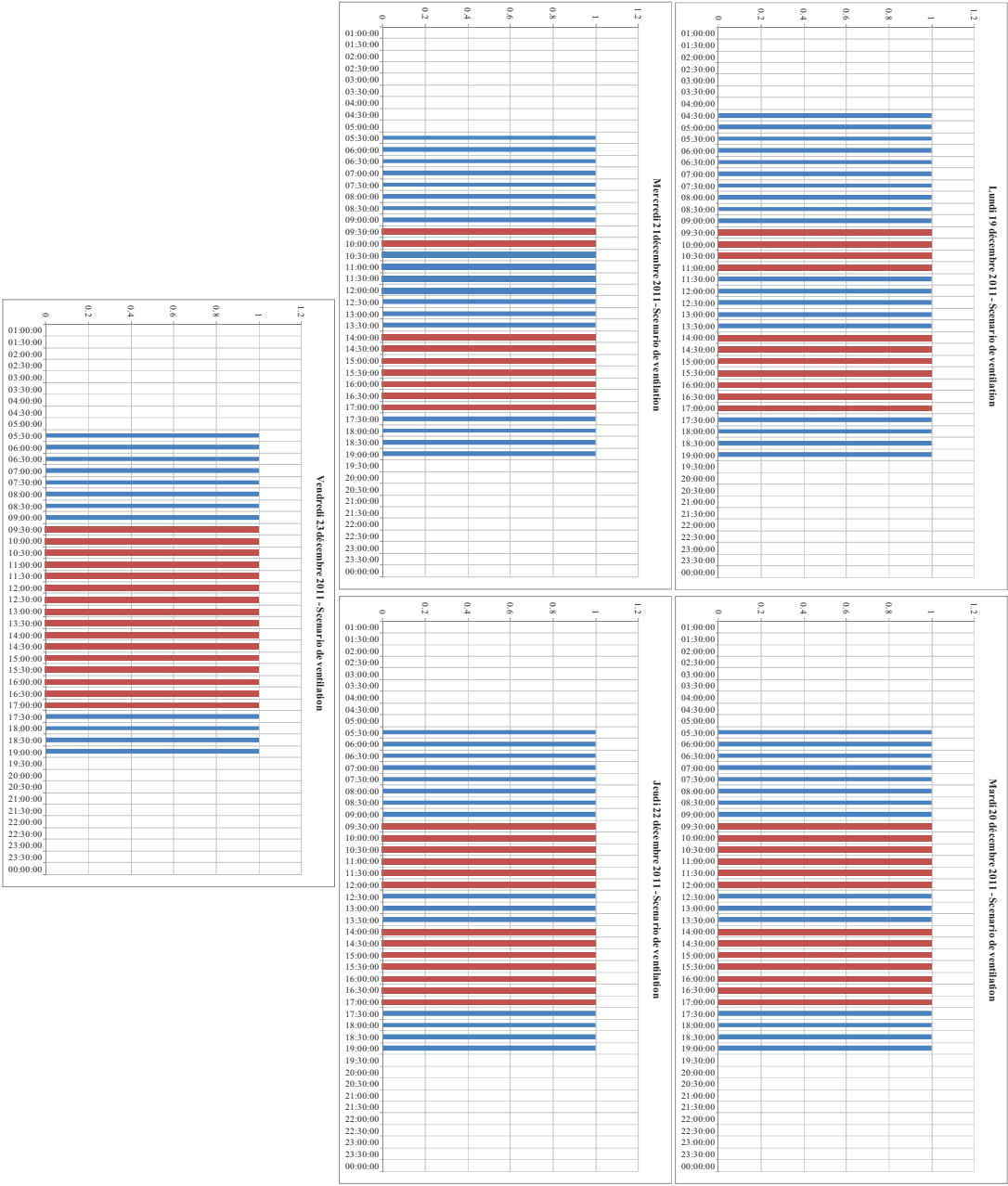


Figure 191. Scenario fonctionnement ventilation mode hiver Tour Elithis

En rouge nous avons les périodes de fonctionnement de la ventilation en tout air neuf, en bleu en tout air recyclé. Ce mode de fonctionnement a été défini pour une question de confort et de consommation. Cela avait été fait pour augmenter le niveau de satisfaction des usagers même s’il n’est pas autorisé au niveau réglementaire.

Dans cette variante nous présenterons les résultats pour un fonctionnement en tout air recyclé mais pour une période plus courte, nous privilégions le fonctionnement en tout air neuf pendant la période d'occupation. Le scenario de fonctionnement est le suivant :

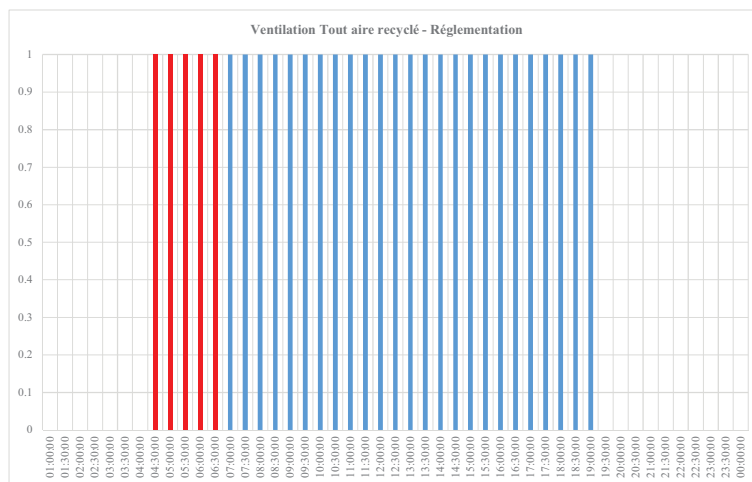


Figure 192. Scenario de fonctionnement recyclage variante 2

Résultats

- Indicateurs QEI – Semaine d'hiver

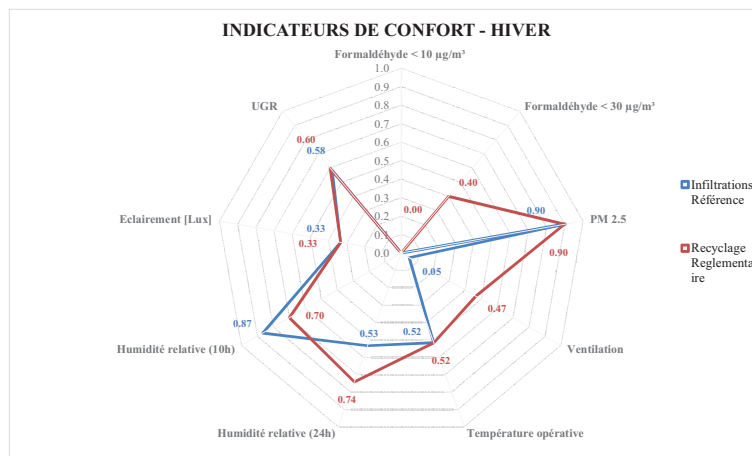


Figure 193. Indicateurs QEI variante 2 – Cas hiver

Les indicateurs du confort humidité 24h, du confort ventilation et des concentrations de formaldéhyde sont plus intéressants par rapport à la solution de référence. Le fait de modifier le mode ventilation et privilégier un fonctionnement en tout air neuf permet d'améliorer la qualité de l'air. L'indicateur du confort thermique ne présente pas d'évolution.

- Indicateurs énergétiques

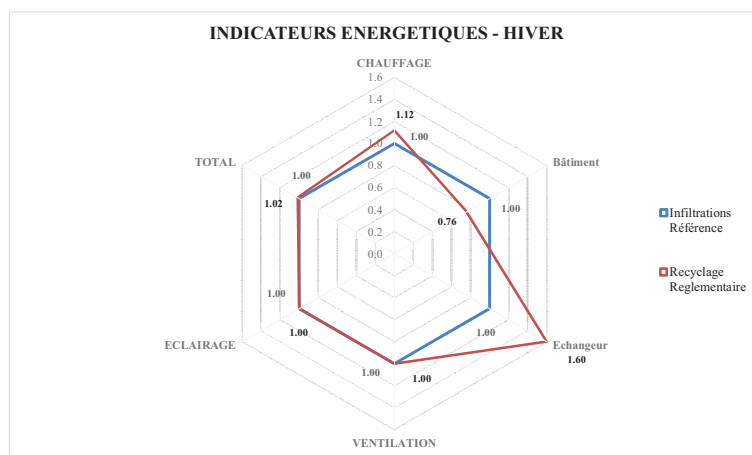


Figure 194. Indicateur énergétique variante 2– Cas hiver

La demande énergétique de cette variante est plus importante (1.12). L'énergie récupéré au niveau de l'échangeur est plus importante (1.60) ce qui permet de diminuer le besoin pour le bâtiment (0.76). Cette solution ne modifié pas la demande total. (1.02).

Conclusion

Cette stratégie ne présente pas d'impact énergétique par rapport à la solution de référence. Le confort thermique est aussi identique. La modification qui a été apportée au scenario de fonctionnement, renouvelle mieux l'air puisque le volume en air frais est plus important. La solution utilisée par Elithis ne présente aucun avantage par rapport au scenario de fonctionnement que nous avons proposé.

5.2.2 Ventilation Tout Air Neuf 7-19h

Description

Cette variante se caractérise, à différence de la précédente, pour un mode de fonctionnement en tout air neuf pendant toute la durée d'occupation, 7-19h. Le scénario de fonctionnement pour le mode hiver est la suivant :

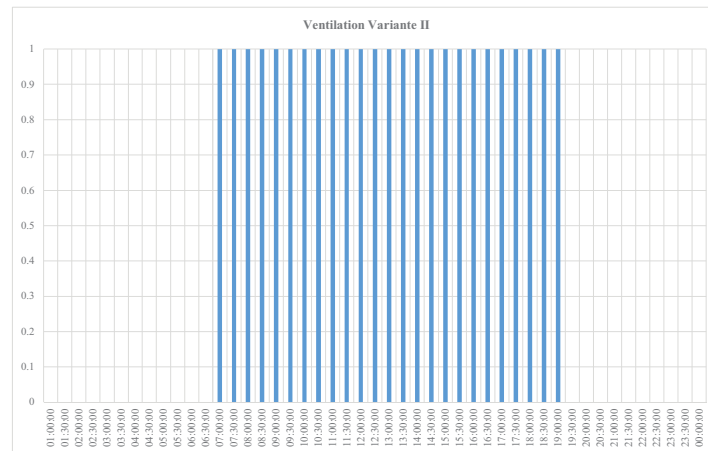


Figure 195. Scenario de fonctionnement Ventilation variante 3 – Cas hiver

Le fonctionnement proposé pour le mode estival est le suivant :

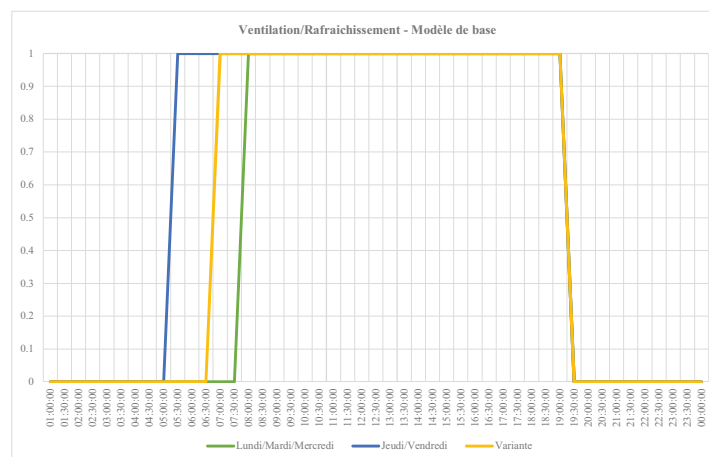


Figure 196. Fonctionnement ventilation / rafraîchissement variante 3 – Cas été

La courbe en jaune, montre le fonctionnement que nous proposons. Pour cette variante nous avons simplement adopté un fonctionnement continu 7-19h pour la ventilation et le rafraîchissement. Par rapport à la solution de référence, le lundi, le mardi et le mercredi, le fonctionnement de la ventilation avait été défini entre 8-19h le jeudi et vendredi de 5.30 à 19h.

Résultats

- Indicateur QEI – Semaine d'hiver

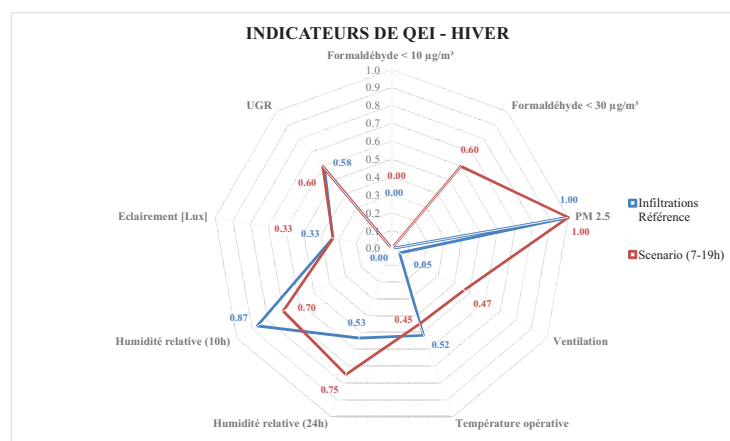


Figure 197. Indicateurs QEI variante 3 – Cas hiver

Nous constatons une dégradation du confort thermique, l'indicateur est passé de 0.52 à 0.45, l'apport en air neuf est plus important ce qui provoque une diminution des températures opératives. L'indicateur de confinement est nettement meilleur de 0.05 à 0.47, un apport en air neuf plus constant permet de diminuer les concentrations en CO₂. De la même manière les concentrations de formaldéhyde diminuent, l'indicateur est de 0.6.

- Indicateur énergétiques – Semaine d'hiver

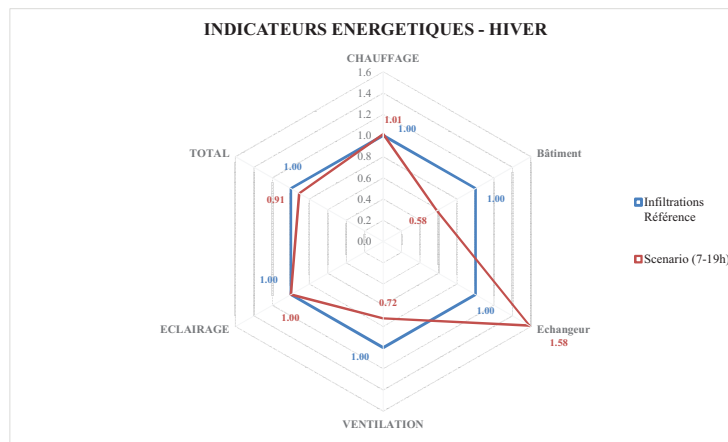


Figure 198. Indicateur énergétiques variante 3 – Cas hiver

La demande énergétique est moins importante avec cette variante par rapport au cas de référence. L'indicateur est de 0.91. Le nombre d'heures de fonctionnement de la ventilation est moins important. D'autre part au niveau du chauffage, nous n'observons pas de différence significative puisque l'énergie récupérée au niveau de l'échangeur est plus importante ce qui permet de compenser la demande totale pour le chauffage.

Indicateurs QEI – Semaine d'été

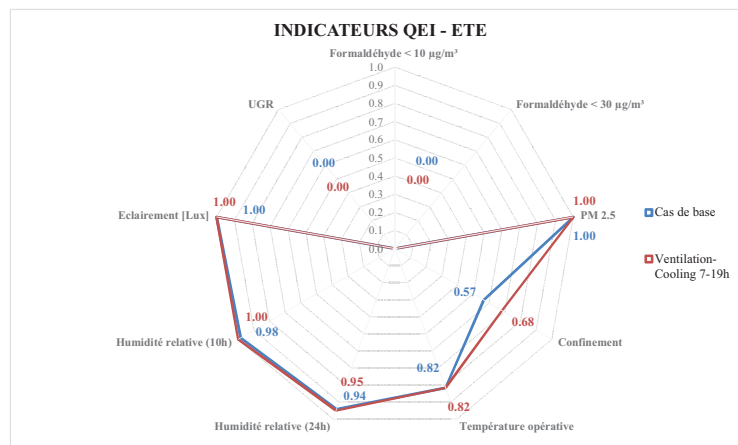


Figure 199. Indicateurs QEI variante 3 – Cas été

Peu de différence sont observées sur l'ensemble des indicateurs QEI. Seulement l'indicateur de confinement présente une évolution de 0.57 à 0.68 du fait de la ventilation. Le scénario de fonctionnement que nous avons proposé, est constant tout au long de la semaine (7-19h). Pour le cas de référence, le lundi, le mardi et le mercredi (voir figure 196), le nombre d'heures de fonctionnement de la ventilation est moins important (8-19h).

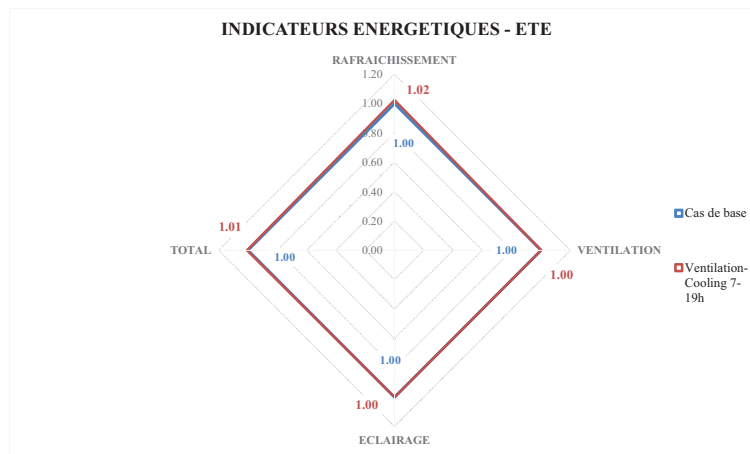


Figure 200. Indicateurs énergétiques variante 3 – Cas été

Au niveau énergétique, la demande en été est très légèrement plus importante avec cette variante, (1.01). Cette variante n'apporte pas un réel gain par rapport au modèle de référence.

Conclusion

Le fait d'augmenter le nombre d'heures de la ventilation permet d'améliorer l'indicateur de confinement et de la QAI. La relation entre renouvellement d'air et QAI est évidente.

Pour le cas hiver, nous avons réduit le nombre d'heures de fonctionnement de la ventilation mais nous avons privilégié le « tout air neuf ». Les indicateurs de formaldéhyde et de confinement sont plus intéressants. En revanche, le confort thermique a été pénalisé. Au niveau énergétique, la demande est moins importante notamment au niveau de la ventilation.

Pour le cas été, le fait d'avoir un mode de fonctionnement plus constant et d'anticiper l'occupation (7-19h) permet de renouveler mieux l'air et d'améliorer l'indicateur de confinement. Au niveau énergétique aucun impact n'a été observé.

Nous avons privilégié avec ce mode de fonctionnement la QAI, nous avons observé un gain au niveau des indicateurs notamment dans le cas hiver. De manière générale, la QAI même si les indicateurs présentent une évolution, ils restent faibles, seul l'indicateur de formaldéhyde $< 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été impacté.

5.2.3 Ventilation 5-19h

Description

Dans cette variante nous présentons l'influence de la ventilation avec un mode de fonctionnement plus important de 5-19h en tour air neuf. Dans la variante précédente, nous avons observé une évolution de la QAI mais le gain reste faible. Nous privilégions un fonctionnement plus important pour impacter de manière plus importante la QAI.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

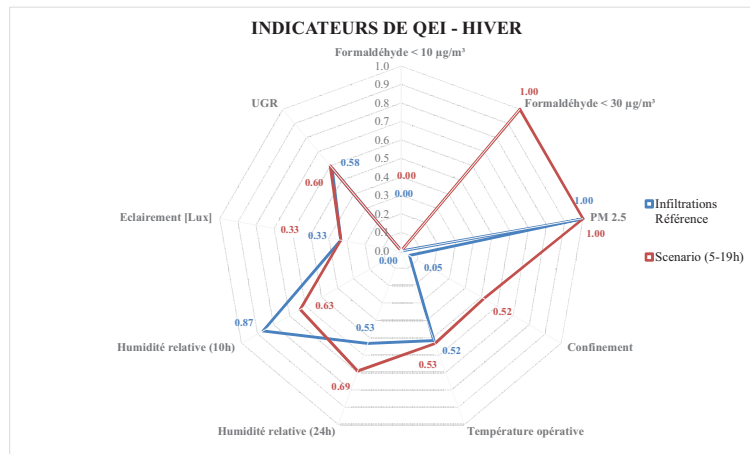


Figure 201. Indicateurs QEI variante 4 – Cas hiver

Augmenter le mode de fonctionnement de la ventilation en tout air neuf, ne permet pas d'améliorer le confort par rapport à la solution de référence. L'indicateur de confinement et du formaldéhyde sont plus intéressants. Privilégier un fonctionnement plus long permet de mieux renouveler l'air, les concentrations en CO₂ diminuent. De la même manière, ce mode de fonctionnement permet de renouveler l'air en inoccupation (5-7h), ce qui permet d'agir sur les concentrations en formaldéhyde. Au niveau de l'humidité, nous observons une diminution de l'indicateur 10h de 0.87 à 0.63, un apport en air frais plus important en période d'occupation, diminue le taux d'humidité relative, puisque l'humidité relative extérieure est plus importante.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

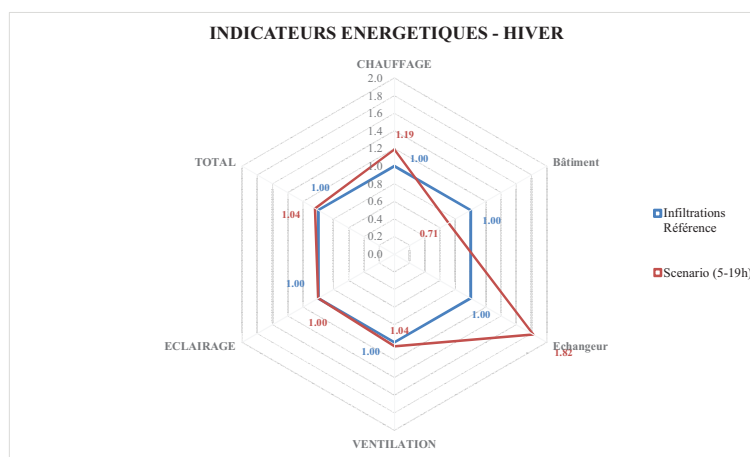


Figure 202. Indicateur énergétiques variante 4 – Cas hiver

La demande énergétique de cette variante est légèrement plus importante (1.04) par rapport au cas de référence. Le fait d'avoir un scénario de ventilation plus importante (5-19h), augmente les déperditions dans l'air, par conséquent la demande de chauffage est plus importante, malgré une récupération au niveau de l'échangeur plus importante. La demande au niveau de la ventilation est plus importante du fait du scénario.

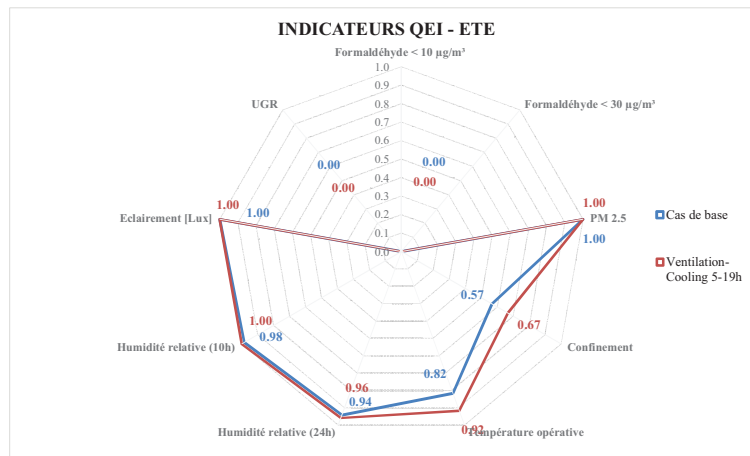


Figure 203. Indicateurs QEI variante 4 – Cas été

Nous observons une amélioration de l'indicateur du confort thermique et du confinement par rapport au cas de référence. Un scénario de ventilation plus importante permet de mieux renouveler l'air et améliorer le confort thermique, de la même manière les concentration en CO₂, qui se traduit par un indicateur de confinement meilleur. En revanche, aucune évolution n'est observée au niveau de la QAI.

Indicateurs énergétiques – semaine été

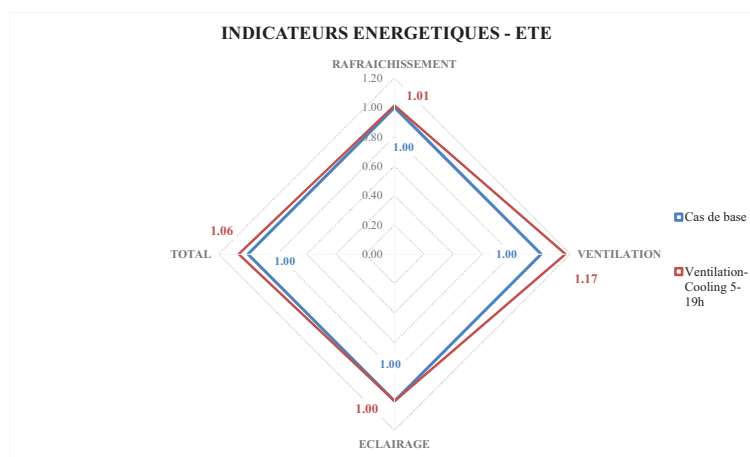


Figure 204. Indicateur énergétiques variante 4 – Cas été

Ce mode de fonctionnement pénalise la demande d'énergétique par rapport au cas de référence. Nous observons notamment au niveau de la ventilation, une demande plus importante.

Conclusion

Pour améliorer la qualité de l'air, nous avons modifié le mode de fonctionnement de la ventilation.

Pour le cas hiver, nous avons proposé un mode de fonctionnement plus long (5-19h). Cela a permis d'améliorer l'indicateur de la QAI, mais l'indicateur du confort thermique est moins bon et la demande énergétique augmente.

Pour le cas été, nous avons observé une amélioration au niveau du confort thermique et du confinement, en revanche la demande énergétique est plus importante. Malgré un fonctionnement de la ventilation plus importante, au niveau de la QAI, aucune évolution n'a été observée.

Cette variante, pour un fonctionnement en hiver, présente une avantage au niveau de la QAI, pour le cas été, aucune amélioration n'est observée. L'impact énergétique est important par rapport à l'évolution observée dans les indicateurs de QEI.

5.2.4 Ventilation Nocturne

Description

Dans les solutions précédentes, nous avons observé une évolution au niveau de la QAI mais elle n'est pas significative puisque l'indicateur de formaldéhyde $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas présenté d'évolution. Pour le cas été, aucune évolution n'est observé. Avec l'arrêt des systèmes de ventilation, en période d'inoccupation, la pollution intérieure ne subit pas de traitement. Dans cette variante, nous ajoutons une ventilation nocturne au modèle de référence. Afin de ne pas impacter de manière significative la demande énergétique, une ventilation naturelle nocturne a été modélisée. Le scénario de fonctionnement est de 19h à 4h avec un taux de renouvellement d'air moyen est de 0.4 vol/h durant cette période.

Résultats

Indicateur QEI – semaine hiver

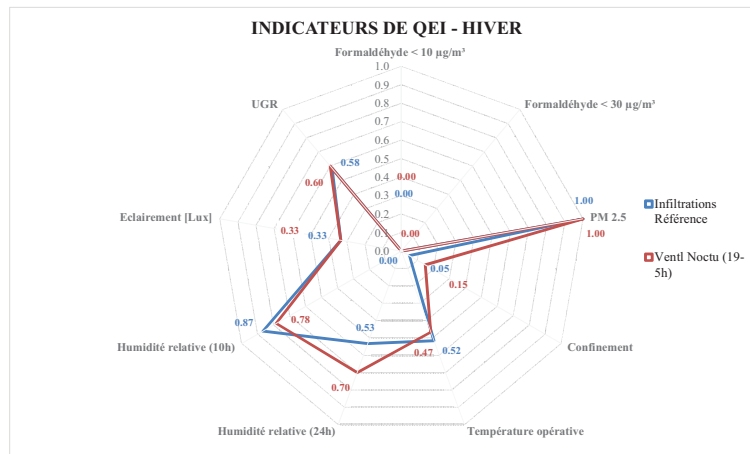


Figure 205. Indicateurs QEI variante 5 – Cas hiver

La ventilation naturelle nocturne permet améliorer légèrement l'indicateur de confinement. Le confort thermique est moins intéressant et une modification de l'humidité est observée.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

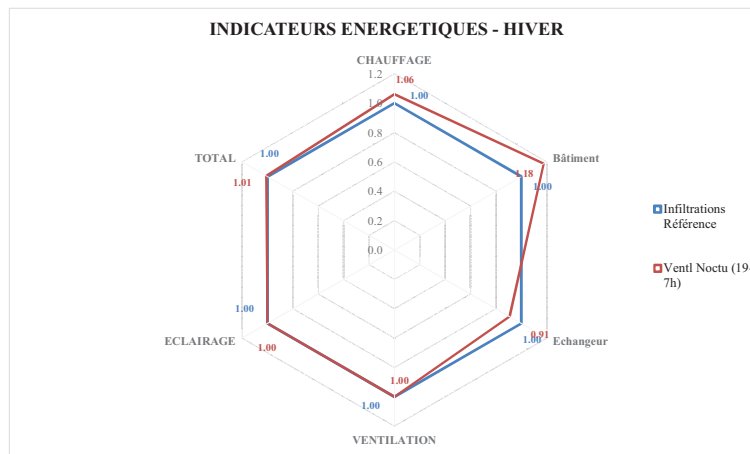


Figure 206. Indicateurs énergétiques variante 5 – Cas hiver

Au niveau énergétique, cette solution n'a que peu d'impact par rapport à la solution de référence. Seulement au niveau du chauffage nous pouvons observer une légèrement modification.

Indicateurs QEI – semaine été

Pour le mode été, nous avons ajouté à notre cas de référence une sur ventilation naturelle nocturne, entre 19h et 5h. Le taux de renouvellement d'air moyen est de 3 vol/h durant cette période.

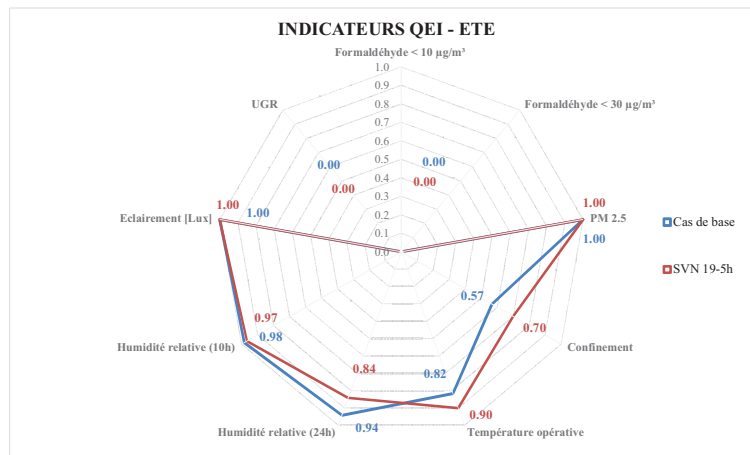


Figure 207. Indicateurs QEI variante 5 – Cas été

Le renouvellement d'air fait la nuit permet un rafraîchissement nocturne, de ce fait le confort thermique est amélioré, de la même manière que l'indicateur de confinement.

Indicateurs énergétiques – semaine été

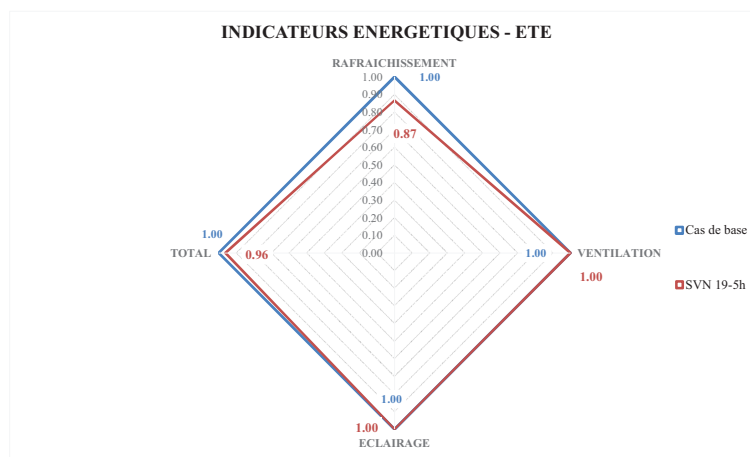


Figure 208. Indicateurs énergétiques variante 5 – Cas été

Au niveau de la demande énergétique, elle est moins importante par rapport au cas de référence.

Conclusion

La ventilation naturelle nocturne est une solution qui ne présente pas d'impact pénalisant au niveau énergétique. Nous avons observé notamment pour le cas été, une diminution de la demande de froid assez intéressante. Pour le cas hiver, l'impact est très faible au niveau énergétique. En revanche, la QAI ne présente pas d'évolution, le renouvellement d'air global n'est pas suffisant. Le scénario de ventilation du modèle de référence n'est pas adapté.

5.2.5 Modulation de débits

Description

Nous avons observé que pour traiter de manière efficace la QAI un effort important doit être fait au niveau de la ventilation. Dans cette variante nous proposons un scénario de fonctionnement de la ventilation en tout air neuf de 7-19h. A cela nous modifions les débits de ventilation, 36 m³/h personne pour le cas hiver et 50 m³/h personne pour le cas été au lieu de 25 m³/h personne.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

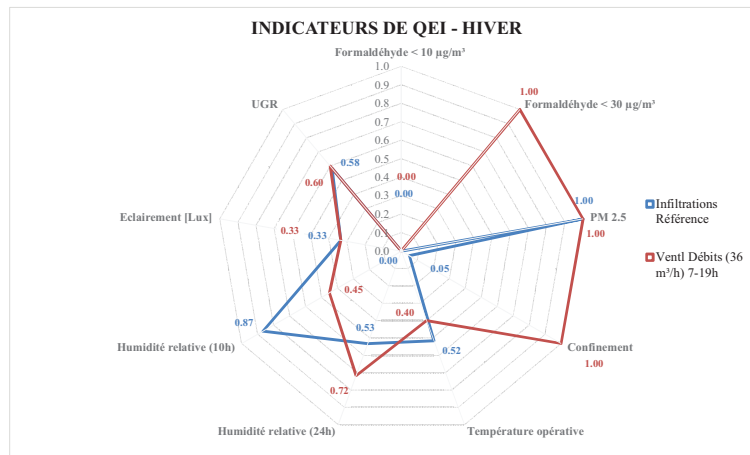


Figure 209. Indicateurs QEI variante 6 – Cas hiver

Cette variante permet d'améliorer considérablement la qualité de l'air par rapport à la solution de référence. Les indicateurs de confinement et de formaldéhyde < 30µg/m³ ont atteint la valeur maximale. En revanche les indicateurs de confort thermique et d'humidité 10h sont moins bons.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

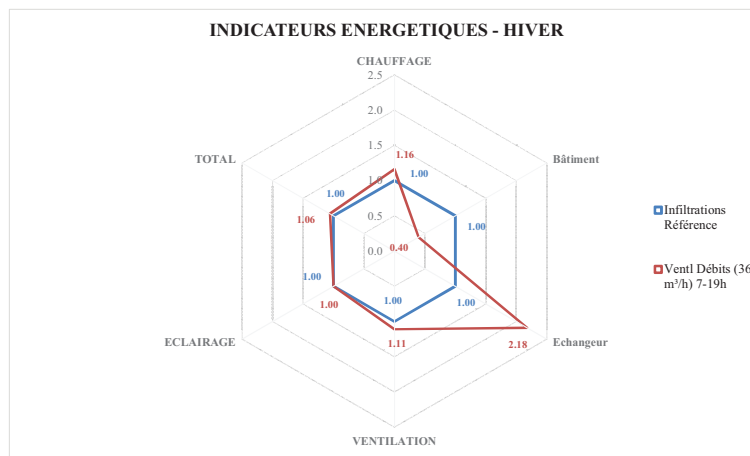


Figure 210. Indicateurs énergétiques variante 6 – Cas hiver

La demande énergétique augmente légèrement (1.06). Au niveau du chauffage, la demande est plus importante, mais le fait d'avoir des débits d'air plus importants permet de mieux récupérer la chaleur au niveau de l'échangeur. La demande liée à la ventilation est aussi plus importante puisque les débits ont augmenté.

Indicateurs QEI – semaine été

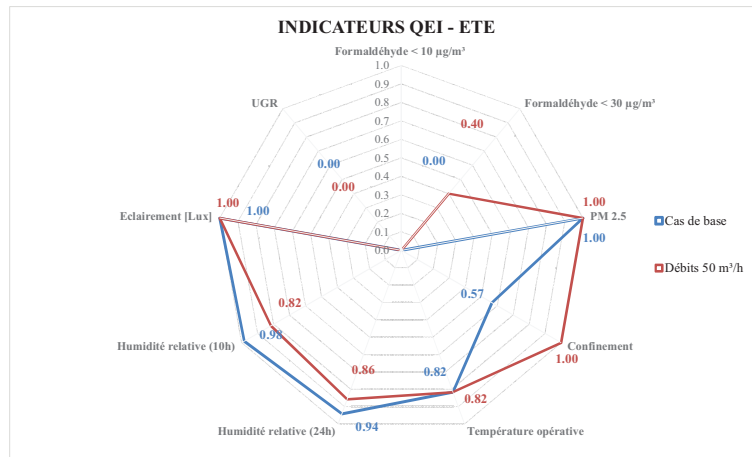


Figure 211. Indicateurs QEI variante 6 – Cas été

L'indicateur de formaldéhyde < 30 µg/m³ présente une évolution intéressante par rapport au cas de référence. De la même manière l'indicateur confinement est intéressant. Les débits d'air modélisés ainsi que le scénario de ventilation permettent d'améliorer considérablement la QAI et le confinement.

Indicateurs énergétiques – semaine été

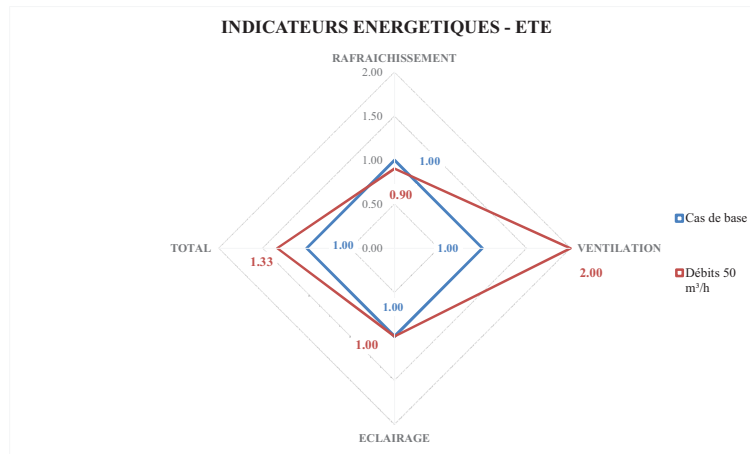


Figure 212. Indicateurs énergétiques variante 6 – Cas été

La demande énergétique avec cette variante est importante par rapport au cas de référence, du fait de la ventilation. Un gain est observé au niveau du froid (0.9) mais il ne permet pas de compenser la demande supplémentaire de la ventilation.

Conclusion

Le fait d'augmenter les débits de ventilation, notamment pour le cas été, augmente considérablement la demande énergétique. La QAI a été améliorée de manière significative mais de manière générale des efforts restent à faire. Le principal inconvénient de cette solution est la demande énergétique.

5.2.6 Ventilation Naturelle

Description

Pour la modélisation de cette variante nous avons pris le modèle de référence de la tour Elithis, les scénarios de fonctionnement sont tous identiques le seul changement est le mode de ventilation, naturelle. Nous avons, donc défini des entrées d'air en façade et une extraction centralisée en toiture, seul le 4^{ème} étage est concerné.

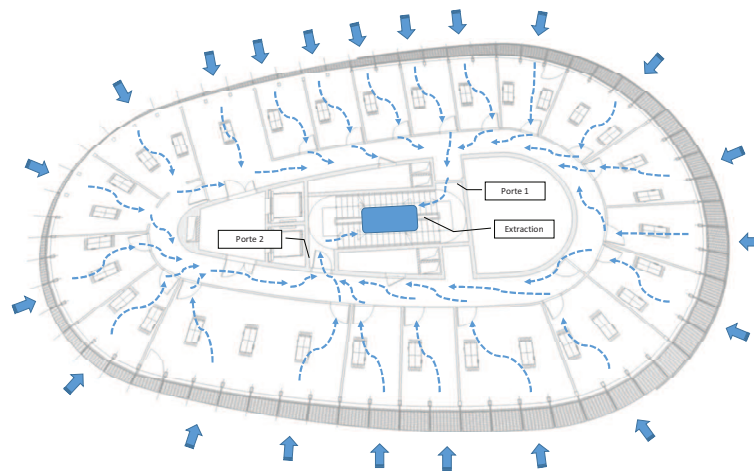


Figure 213. Schéma de fonctionnement de la ventilation naturelle

Une entrée d'air a été définie dans chaque bureau, la surface de passage est 250 cm² (2.5 x 120 cm) pour le mode hiver et 720 cm² (6 x 120 cm) pour le mode estivale. Une grille de passage de 1800 cm² (20 x 90 cm) située au-dessus de chaque porte de bureau permet à l'air de circuler jusqu'au couloir. Les cages d'escalier permettent de réaliser l'extraction. Entre le couloir et les cages d'escalier deux portes permettent d'accéder, nous avons défini une aire de passage au-dessus de chaque porte de 2400 cm² (20 x 120 cm).

Nous avons déterminé, par le biais de la CFD, les coefficients de pression (Cp) de chacune des entrées d'air extérieures. Nous avons ensuite utilisé le modèle de « AFN » décrit en Energy Plus pour la modélisation de la ventilation naturelle. Le scénario d'ouverture des entrées d'air est de 7h à 19h en continu.

NOTA. Le confort thermique pour le cas été a été analysé avec la méthode du confort adaptatif présentée dans le chapitre II.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

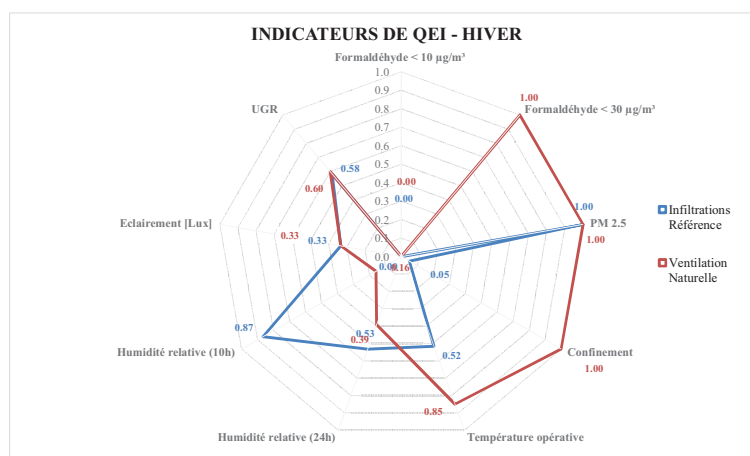


Figure 214. Indicateurs QEI variante 7 – semaine hiver

La ventilation naturelle permet d'améliorer considérablement l'indicateur de la qualité de l'air intérieur. De la même manière, l'indicateur de confinement est très intéressant. L'indicateur du confort thermique est aussi plus intéressant et cela malgré le fonctionnement de la ventilation. En revanche, l'indicateurs de l'humidité ne donne pas un résultat satisfaisant, les débits plus importants impact considérablement l'humidité puisque l'air extérieur rentre directement dans le bâtiment.

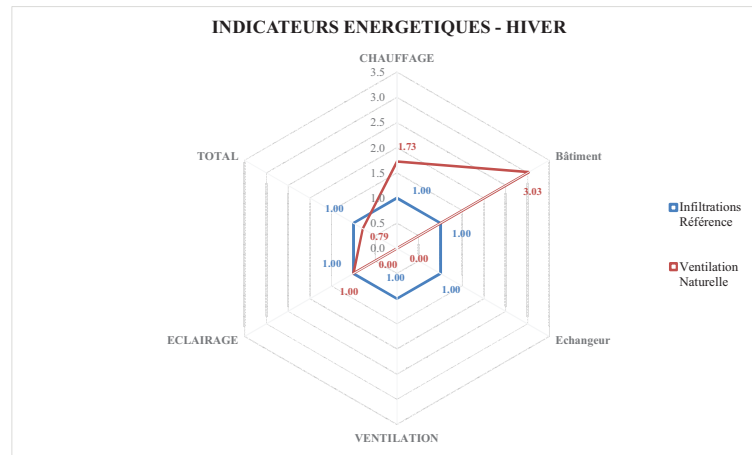


Figure 215. Indicateurs énergétiques variante 7 – Semaine hiver

La ventilation naturelle pénalise considérablement la demande de chauffage du bâtiment, elle est 3 fois plus importante par rapport à notre cas de référence, en revanche aucune demande n'est enregistrée pour la ventilation cela permet de compenser le chauffage est de réaliser un gain assez intéressant de manière générale. La demande énergétique totale est moins importante par rapport au cas de référence, 0.79. Le fait de ventiler le bâtiment de manière naturelle permet finalement de faire des économies substantielles.

Indicateurs QEI – semaine été

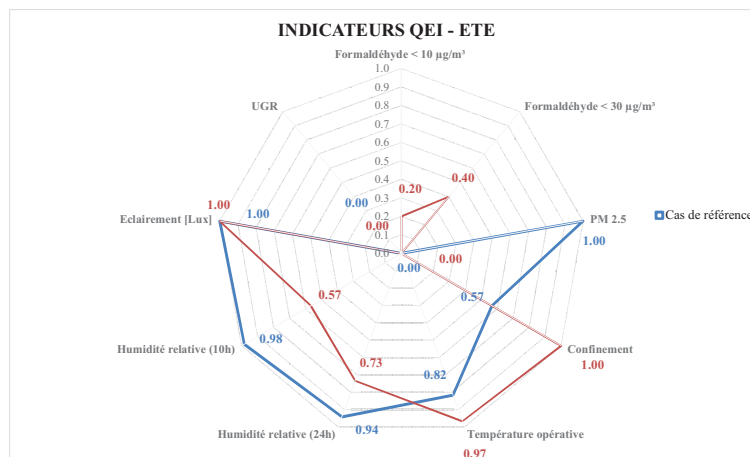


Figure 216. Indicateurs QEI variante 7 – Cas été

La ventilation naturelle pendant le mode été présente des résultats assez partagés. Au niveau des indicateurs de confort thermique, de confinement et de formaldéhyde nous observons une évolution intéressante. En revanche, les indicateurs d'humidité sont moins bons. L'indicateur PM 2.5 n'est pas satisfaisant. Le renouvellement d'air est plus important ce qui a permis de traiter la QAI, ce mode de ventilation ne filtre pas l'air, les concentrations en PM 2.5 sont donc, plus importantes.

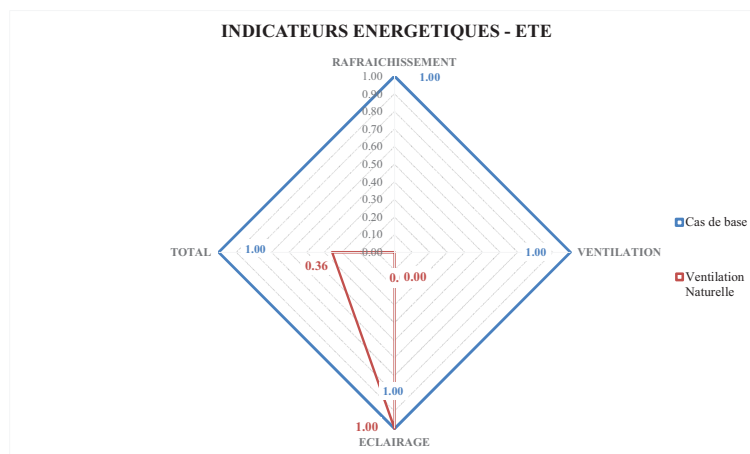


Figure 217. Indicateurs énergétiques variante 7 – Cas été

En termes de demande énergétique, la variante ventilation naturelle, permet de réaliser des économies très importantes. L'absence de la demande liée à la ventilation et au rafraîchissement explique ce bon résultat.

Conclusion

Au niveau énergétique cette variante présente un énorme avantage par rapport au cas de référence. L'absence de consommations liées à la ventilation permet de faire d'importantes économies.

La QAI est mieux traitée avec ce mode de fonctionnement vis-à-vis de la pollution intérieure. En revanche, vis-à-vis de la pollution extérieure, nous avons observé un résultat qui n'est pas satisfaisant. L'efficacité est moins intéressante du fait d'un taux de renouvellement d'air plus important. La concentration de PM 2.5 qui a été modélisée à l'extérieur est de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Valeur du pic de pollution Mai 2014 – Dijon). Nous avons décidé d'utiliser une valeur de la concentration de particules fines plus importante pour vérifier l'efficacité de la variante de manière plus précise. Pour cette raison l'indicateur est moins bon.

5.3 Protections solaires

Nous avons étudié deux types de protections solaires ; brises soleils orientables (BSO) et verre électrochrome. Dans cette partie, nous avons étudié les performances de chaque variante par rapport au cas de référence, bouclier thermique.

5.3.1 Brises Soleil Orientables (BSO)

Description

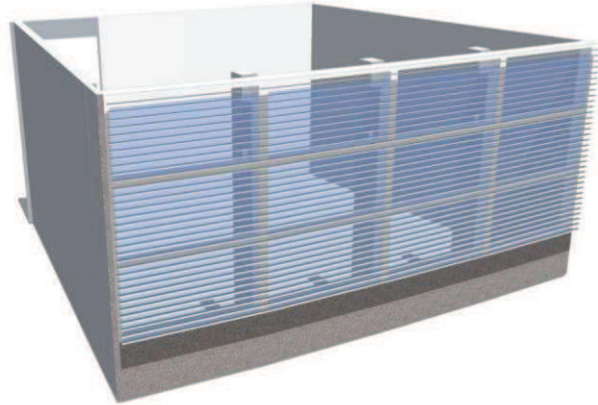


Figure 218. Brise soleil orientables

Les brises soleil orientables sont une protection solaire qui permet de gérer, de manière plus efficace, les apports solaires, puisque l'orientation des lames peut être modifiée, de manière automatique ou manuelle. Elle a été adaptée à un usage extérieur et automatisé. Une régulation en fonction du rayonnement, de la température ou une programmation horaire, peuvent être adaptés.

Pour notre modélisation, nous avons remplacé le bouclier solaire par des BSO à lames plates de 65 mm de large et un espacement entre lames de 60 mm. Cela permet d'occulter le soleil de manière efficace. Au niveau du fonctionnement, le scénario est le suivant :

Heure	Angle			
	Hiver		Été	
	Semaine	Weekend	Semaine	Weekend
0	0	0	90	0
1	0	0	90	0
2	0	0	90	0
3	0	0	90	0
4	0	0	90	0
5	0	0	90	0
6	0	0	90	0
7	0	0	90	0
8	90	0	90	0
9	90	0	90	0
10	90	0	90	0
11	90	0	90	0
12	90	0	90	0
13	90	0	90	0
14	90	0	90	0
15	90	0	90	0
16	90	0	90	0
17	90	0	90	0
18	90	0	90	0
19	90	0	90	0
20	0	0	90	0
21	0	0	90	0
22	0	0	90	0
23	0	0	90	0

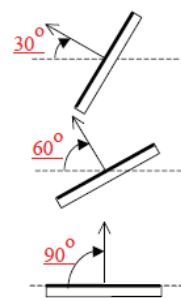


Figure 219. Scénario de fonctionnement des BSO

L'hiver nous avons défini une fermeture programmée le soir (0°) et le weekend pour limiter les déperditions de chaleur. La journée l'angle d'ouverture est fixée à 90° à partir de 50 W/m². L'été, en semaine l'angle d'ouverture est fixé à 90° sur toute la journée, de la même manière une fermeture a été programmée pour diminuer les apports solaires au maximum pendant l'inoccupation du bâtiment.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

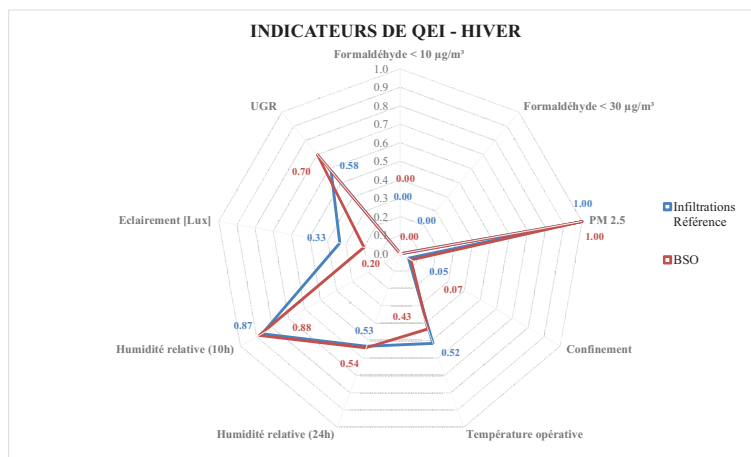


Figure 220. Indicateurs QEI variante 8 – Cas hiver

Nous pouvons observer une diminution du risque d'éblouissement, l'indicateur passe de 0.58 à 0.70. Les apports solaires sont moins importants (0.2) de ce fait le risque d'éblouissement diminue (0.7). Par contre, nous pouvons constater une dégradation du confort thermique. L'apport solaire est plus faible ce qui pénalise les températures opératives.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

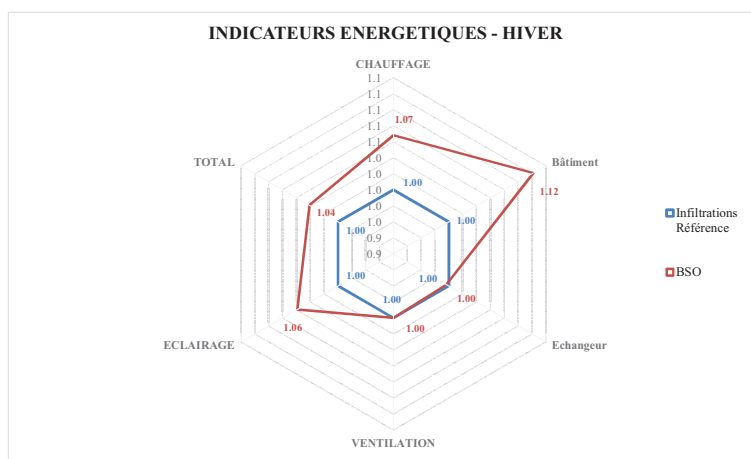


Figure 221. Indicateurs énergétiques variante 8 – Cas hiver

Au niveau de la demande énergétique, celle-ci est légèrement plus importante, ce type de protection solaire diminue les apports solaires et par conséquent augmente légèrement la demande de chauffage et d'éclairage. De manière générale, cette variante, pour un fonctionnement hiver, peut permettre d'améliorer le confort visuel sans impacter considérablement le confort thermique ni la demande énergétique. Par rapport au bouclier cette solution serait une bonne alternative.

Indicateurs QEI – semaine été

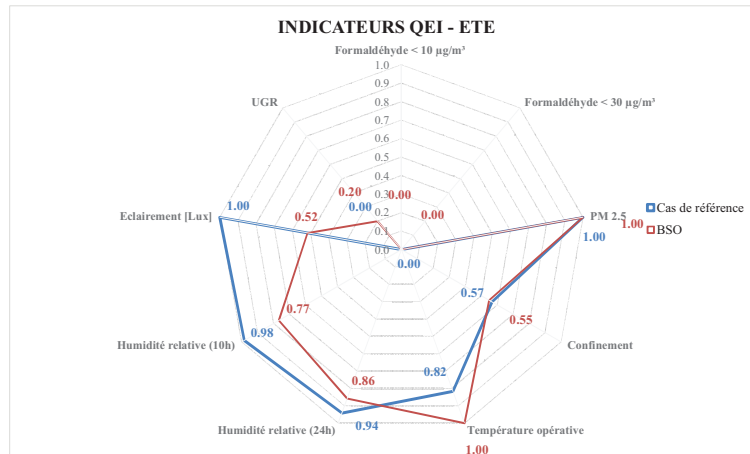


Figure 222. Indicateurs QEI variante 8 – Cas été

L'utilisation des BSO permet d'améliorer le confort visuel et thermique. Le risque d'éblouissement diminue mais si nous le comparons à la dégradation de l'indicateur éclairage, le gain est faible. Comme dans le cas hiver, les apports solaires sont mieux maîtrisés ce qui permet d'améliorer le confort thermique. Au niveau de l'humidité les indicateurs montrent une diminution du confort.

Indicateurs énergétiques – cas été

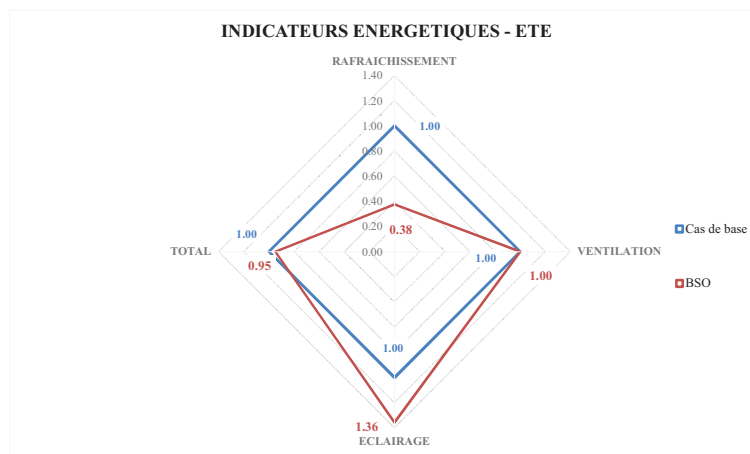


Figure 223. Indicateurs énergétiques variante 8 – Cas été

Au niveau de la demande énergétique, cette solution permet de réaliser un gain important en termes des besoins en froid. Une meilleure maîtrise des apports solaires induit directement la demande de froid. Au niveau de l'éclairage nous pouvons observer une augmentation de la demande due à une protection plus importante, dans le bilan total nous pouvons constater un gain énergétique global (0.95).

Conclusion

Cette solution pour le cas estival est une bonne alternative, elle permet de diminuer la demande énergétique tout en améliorant le confort thermique et visuel. Pour le cas hiver, nous avons constaté une augmentation de la demande mais qui reste faible et qui pourrait être compensée par le gain observé au niveau du froid. Le confort visuel est mieux maîtrisé.

5.3.2 Vitrage électrochrome

Description

Ce vitrage permet de réduire considérablement les apports solaires, puisque le facteur solaire peut être modifié en fonction de l'ensoleillement. La couleur devient plus opaque, les apports solaires peuvent être réduits jusqu'à 97%. Nous avons modélisé ce type de vitrage en prenant le modèle de référence et en remplaçant tous les vitrages par celui-ci. Nous avons obtenu les caractéristiques du vitrage avec le logiciel WINDOW du LBNL. Un scénario de fonctionnement continu a été défini en fonction du rayonnement solaire horizontal, si la valeur est supérieure à 50 W/m², le facteur solaire est de 0.007. Le facteur solaire par défaut est de 0.47.



Figure 224. Verre électrochrome

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

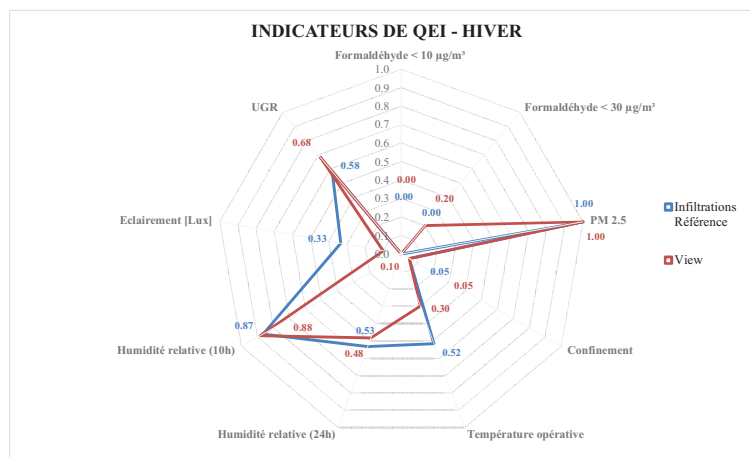


Figure 225. Indicateurs QEI variante 9 – Cas hiver

Au niveau du confort visuel, les résultats sont un peu plus intéressants avec le verre électrochrome par rapport au cas de référence. Les apports solaires sont mieux maîtrisés ce qui se traduit par un indicateur d'éclairement de 0.1. Le risque d'éblouissement est diminué. En revanche, le confort thermique est dégradé (0.3). En ce qui concerne l'indicateur de la QAI, les températures sont plus faibles ce qui diminue l'émission de formaldéhyde (0.2).

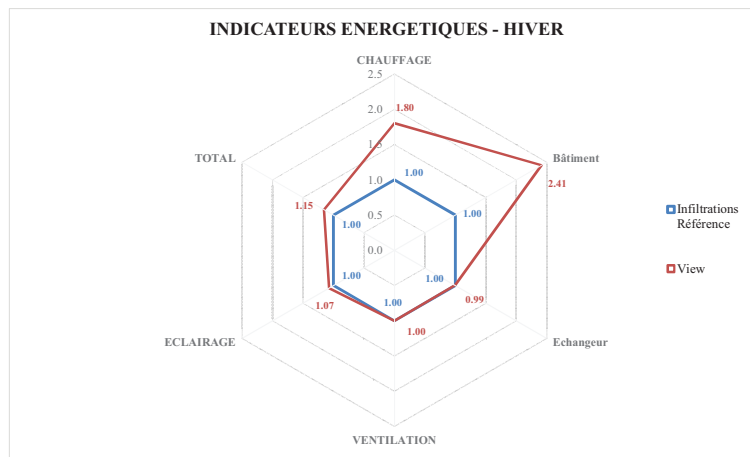


Figure 226. Indicateurs énergétiques variante 9 – Cas hiver

Cette solution n'est pas intéressante du point de vue énergétique. La demande est plus importante du fait des apports solaires plus faibles. Le chauffage est fortement pénalisé. Modifier le scénario de fonctionnement pourrait permettre d'améliorer l'efficacité de cette variante, passer d'une consigne de 50 W/m² à 150 W/m² pourrait permettre de profiter plus de l'ensoleillement en hiver mais le risque d'éblouissement risquerait d'être plus important.

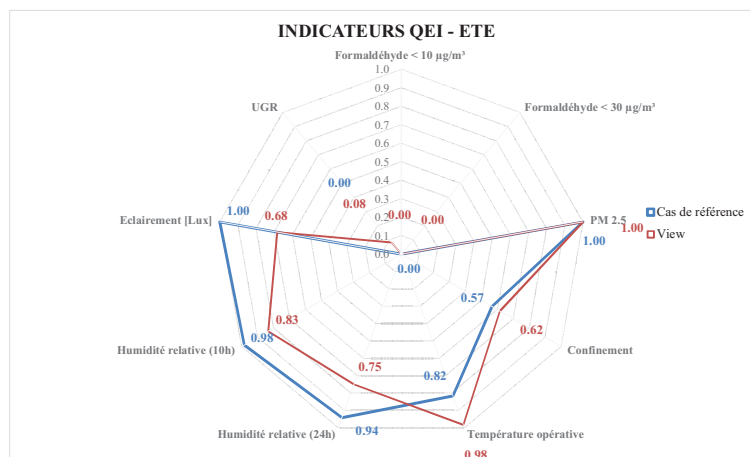


Figure 227. Indicateur QEI variante 9 – Cas été

Le confort visuel n'a pas subi une amélioration considérable, 0.08, malgré une forte diminution de l'éclairage, 0.68. La régulation que nous avons modélisée a été définie pour un ensoleillement supérieur à 50 W/m², consigne qui est déjà faible. Au niveau du confort thermique nous pouvons observer une amélioration très intéressante, 0.98 du fait d'une bonne maîtrise des apports solaires. En revanche, les indicateurs de l'humidité ont été dégradés du fait de températures extérieures plus faibles.

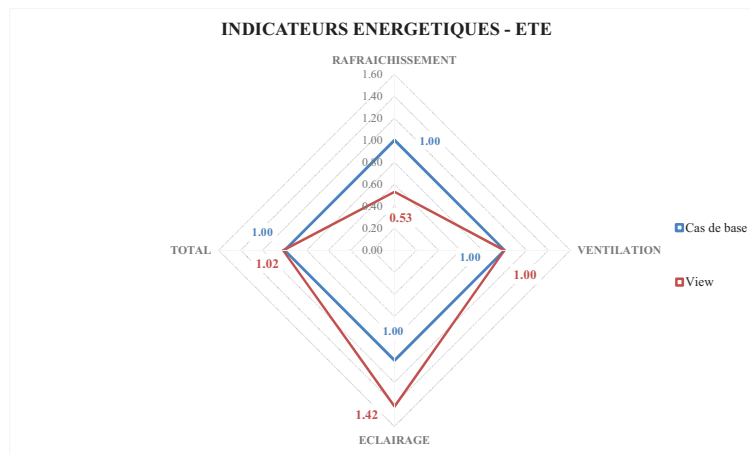


Figure 228. Indicateurs énergétiques variante 9 – Cas été

Au niveau de la demande énergétique, cette solution permet de réduire considérablement la demande de froid. Le bilan total montre une légère augmentation de la demande, malgré l'impact sur l'éclairage, la demande énergétique globale reste équivalente par rapport à la solution de référence.

Conclusion

Nous avons observé les résultats obtenus avec la solution vitrage électrochrome. De manière générale, cette solution n'est pas intéressante du point de vue énergétique. Cette solution permet de réaliser une bonne maîtrise des apports solaires, le confort visuel est meilleur. En revanche, le confort thermique est pénalisé du fait d'une protection solaire importante. La demande énergétique pour le cas hiver est plus importante et pour le cas été reste identique au cas de référence.

Au niveau de la QAI, la forte diminution des apports solaires reçus par le bâtiment, se traduit en une diminution des températures intérieures, l'émission de formaldéhyde des matériaux est moins importante. Cette solution ne s'adapte pas bien à notre cas mais pour d'autres types de bâtiments, magasins, centre commerciaux, elle peut être une bonne alternative.

5.4 Influence de l'inertie (Masse – MCP)

De façon à évaluer l'effet de la mise en jeu de l'inertie, deux types de matériaux ont été analysés, le béton et les matériaux à changement de phase (MCP). Pour le premier, le faux plafond a été supprimé, la dalle de l'étage supérieur est en contact direct avec l'air intérieur pour agir comme «stockeur» des calories. Pour les MCP, ils peuvent être utilisés en tant que finition, nous avons ajouté une couche de 1 cm au niveau des faux plafonds. Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes :

Tableau 54. Caractéristiques inertie

	Béton	MCP
Epaisseur [m]	0.2	0.011
Conductivité [W/m K]	2	2
Masse volumique [kg/m ³]	2150	235
Chaleur spécifique [J/kg K]	1008	1970

5.4.1 MCP

Description

Les MCP modifient leur état en fonction de la température (solide-liquide liquide-solide). Ils absorbent sous forme de chaleur latente l'énergie présente dans l'air. En hiver, ils permettent de garder plus long temps la chaleur et la restituer lentement, la demande énergétique pour le chauffage peut diminuer. En mode été, ils stockent la chaleur, la température intérieur est mieux régulé et la demande de froid peut diminuer. La courbe de fonctionnement du MCP que nous avons modélisé est la suivante :

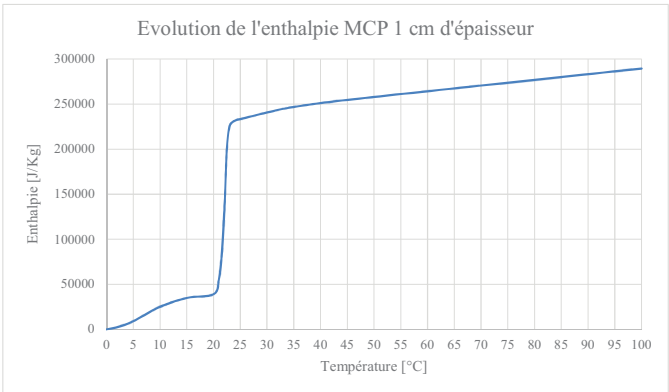


Figure 229. Caractéristiques matériaux à changement de phase

La figure 229, montre l'évolution de l'enthalpie en fonction de la température, le changement d'état s'effectue entre 20 et 25°C environ.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine été

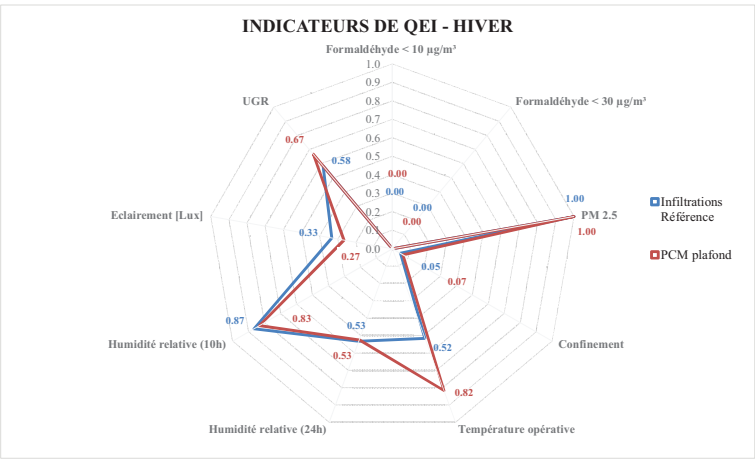


Figure 230. Indicateurs QEI variante 10 – Cas hiver (MCP)

L'utilisation des MCP montre des résultats assez intéressants au niveau du confort thermique. L'indicateur a évolué de 0.52 à 0.82. Le stockage réalisé par les MCP permet d'augmenter la température des parois améliorant ainsi la température opérative. Les évolutions observées au niveau des indicateurs d'éclairage et d'UGR, sont dus aux valeurs de réflexion pour les revêtements qui intègrent les MCP, 0.9. Le coefficient de réflexion dans le visible est de 0.5 contre 0.3 pour une finition classique.

Indicateur énergétiques – semaine hiver.

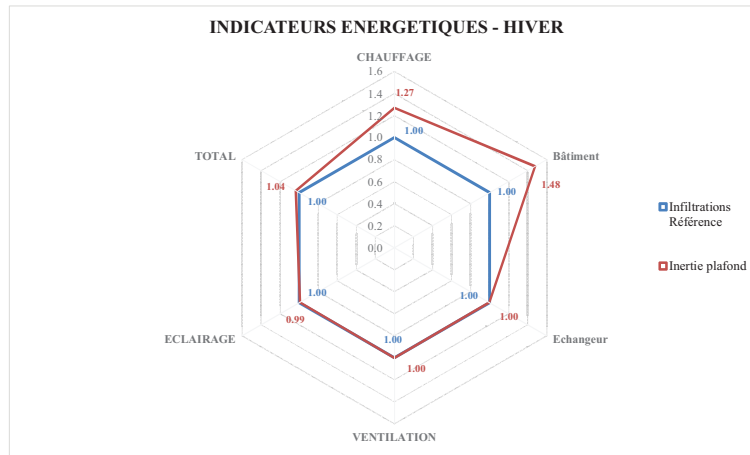


Figure 231. Indicateurs énergétiques variante 10 – Cas hiver (MCP)

Au niveau de la demande énergétique, une augmentation de chauffage est observée, l'indicateur est maintenant de 1.27. Les MCP force le système de chauffage pour modifier leur état. Les MCP prennent l'énergie présente dans l'air, impactant la demande énergétique. De manière générale, nous pouvons observer une très faible augmentation de la demande énergétique.

Indicateurs QEI – semaine été

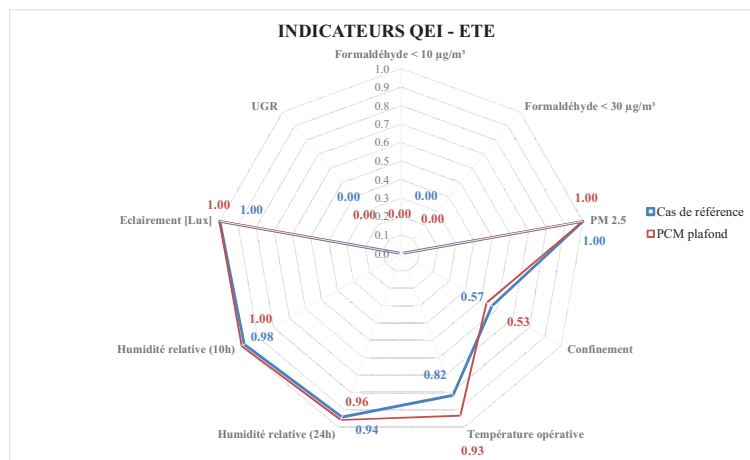


Figure 232. Indicateurs QEI variante 10 – Cas été (MCP)

De la même manière que pour le cas hiver, les MCP permettent d'améliorer le confort thermique estival. Ils stockent le surplus d'énergie permettant ainsi de réduire les pics de chaleur grâce à leur capacité de stockage. L'indicateur de confort évolue de 0.82 à 0.93.

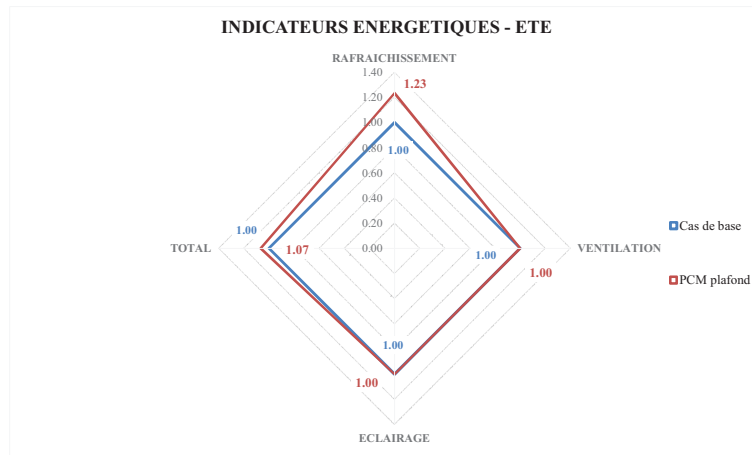


Figure 233. Indicateurs énergétiques variante 10 – Cas été (MCP)

La demande énergétique est plus importante avec l'utilisation des MCP, en cause le rafraîchissement. Le manque de ventilation et l'absence d'infiltrations ne permet pas le renouvellement d'air la nuit, la température au sein du bâtiment ne diminue pas et les calories stockées dans les MCP ne sont pas libérées. Cette variante MCP nécessite une ventilation nocturne pour que son efficacité soit maximale. Cela explique la demande plus importante.

5.4.1.1 MCP Sur ventilation Nocturne

Résultats

Afin de mieux comprendre le comportement des MCP, nous avons utilisé la variante sur ventilation (section 5.4.5) couplé avec les MCP.

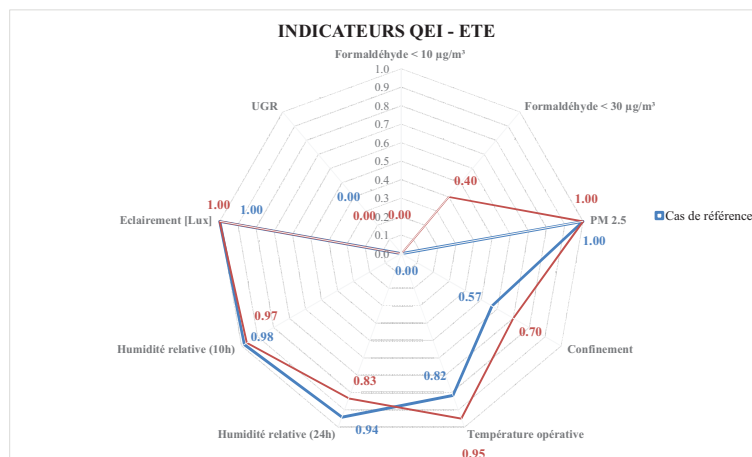


Figure 234. Indicateurs QEI variante 11 – Cas été (MCP - SVN)

La sur ventilation permet d'améliorer l'efficacité des MCP, l'indicateur du confort thermique a légèrement évolué de 0.93 à 0.95. Au niveau du formaldéhyde, nous pouvons observer un gain, l'indicateur est maintenant de 0.40. La sur ventilation a modifiée les concentrations de particules fines puisque le volume d'air qui rentre dans le bâtiment est plus important. Pour le reste des indicateurs nous n'observons pas d'évolution.

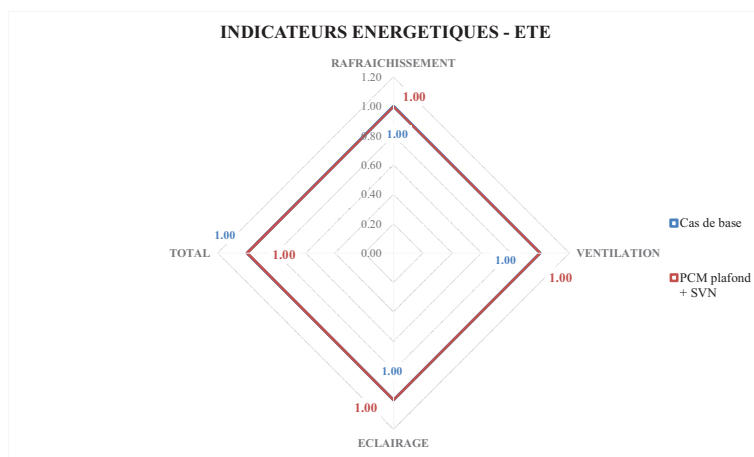


Figure 235. Indicateurs énergétiques variante 11 – Cas été (SVN MCP - SVN)

Aucune différence n'est observée avec l'utilisation des MCP couplée à une sur ventilation nocturne. La chaleur cumulée par les MCP doit être évacuée et les débits utilisés ne seraient pas suffisants, des taux de renouvellement plus importants devraient être intégrés pour améliorer l'efficacité du système. Les températures intérieures ne descendent pas suffisamment pour que les MPC puissent changer d'état (liquide-solide).

5.4.2 Influence de l'inertie (Masse – Béton)

Description

Dans cette variante, les faux plafonds ont été supprimés. Nous avons étudié l'utilisation de la masse du bâtiment.

Résultats

Indicateurs QEI – semaine hiver

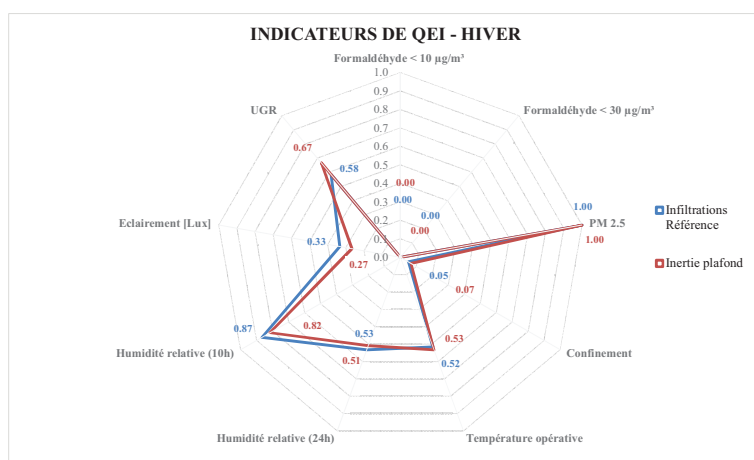


Figure 236. Indicateurs QEI variante 12 - Cas hiver (Béton)

Par rapport à la solution MCP, nous pouvons observer une différence plus importante au niveau du confort thermique, l'indicateur est plus faible, 0.53 contre 0.82. Le béton stocke de la même manière que les MCP une partie de l'énergie du fait de sa masse volumique plus importante. Aucun gain au niveau du confort n'est observé.

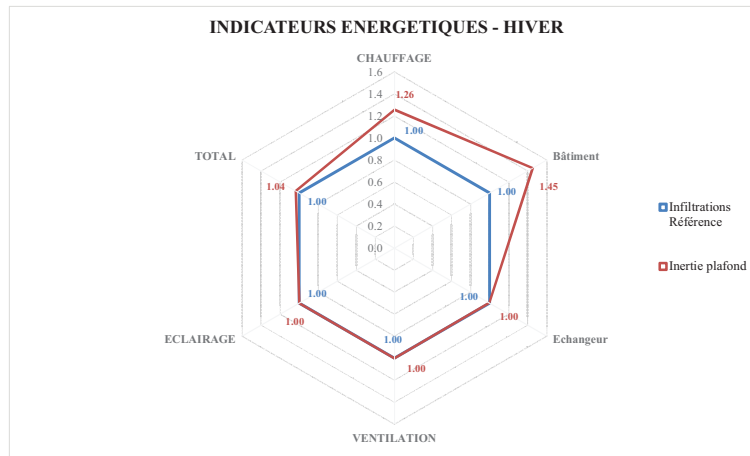


Figure 237. Indicateurs énergétiques variante 12 – Cas hiver (Béton)

L'indicateur du chauffage est plus élevé (1.26) mais au niveau de l'éclairage il n'y a pas d'évolution, le bilan final reste proche par rapport au cas de référence. Entre le béton et le MCP, au niveau énergétique il n'existe pas de différences ce qui favorisera l'utilisation du béton. Puisque les structures des bâtiments est faite en béton.

Indicateurs QEI – semaine été

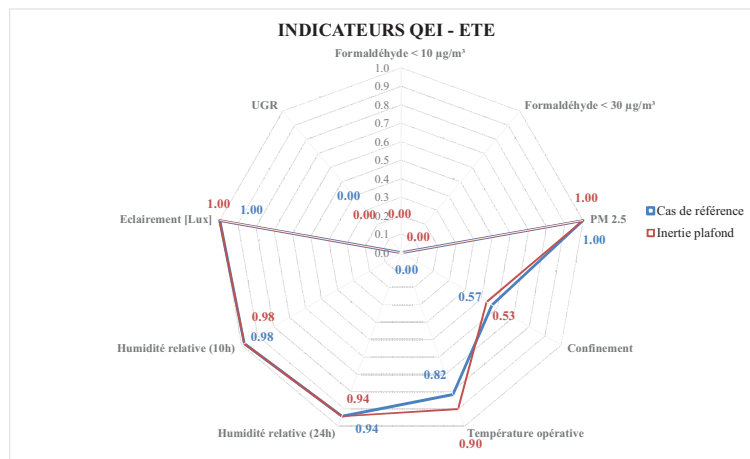


Figure 238. Indicateurs QEI variante 12 – Cas été (Béton)

Avec la solution béton, nous pouvons observer une amélioration au niveau du confort. L'indicateur est plus intéressant (0.90). Pour le reste des indicateurs aucune évolution n'est observée.

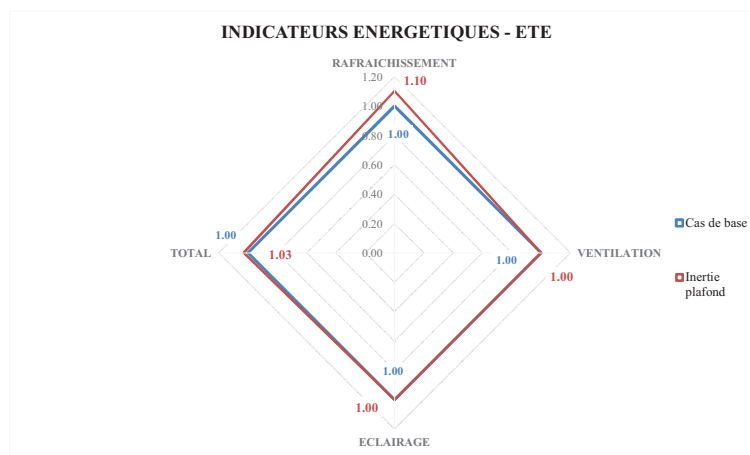


Figure 239. Indicateurs énergétiques variante 12 – Cas été (Béton)

Au niveau de la demande, cette variante augmente la demande de froid. De la même manière qu'avec les MCP, le béton permet de stocker de l'énergie mais si cette énergie ne peut pas être évacuée cela augmente la demande de froid, l'impact est moins important avec la solution qu'avec la solution MCP, 1.10 contre 1.23.

5.4.3 Béton + Sur ventilation nocturne

L'utilisation de la masse du bâtiment permet d'améliorer le confort mais pénalise la demande de froid, l'impact est moins important qu'avec l'utilisation de MCP. Nous allons regarder les résultats avec une solution béton couplé avec une sur ventilation nocturne.

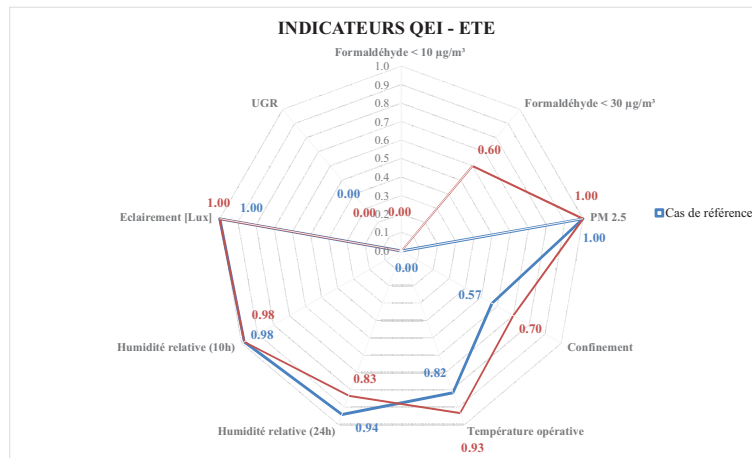


Figure 240. Indicateurs QEI variante 13 – Cas été (Béton + SVN)

L'utilisation du béton permet de réaliser un gain plus intéressant. Au niveau du confort thermique l'indicateur passe de 0.82 à 0.93. Au niveau de l'indicateur QAI, le résultat est plus intéressant. Même en comparaison à la solution MCP l'utilisation du béton permet de diminuer les concentrations grâce à des températures plus faibles.

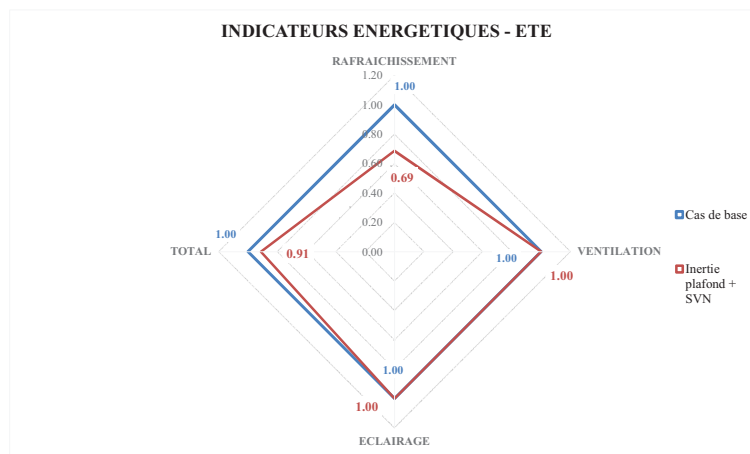


Figure 241. Indicateurs énergétiques variante 13 – Cas été (Béton + SVN)

La demande énergétique diminue considérablement. Au niveau du froid, l'indicateur affiche une valeur de 0.65, pour le cas avec MCP nous n'avons pas observé de différences. Cette solution permet de réaliser un gain énergétique plus intéressant.

Conclusion

La solution béton couplée avec une sur ventilation nocturne, permet d'améliorer le confort thermique et de diminuer les concentrations de formaldéhyde tout en diminuant la demande en froid. La solution MCP couplée avec une sur ventilation nocturne permet de mieux gérer le confort thermique, car elle stocke une plus grande quantité d'énergie mais de la même manière, qu'elle stocke, la quantité d'énergie qui doit être libérée est plus importante, cela explique la demande énergétique plus importante.

5.5 Enveloppe du bâtiment

Dans cette partie nous présentons les résultats obtenus pour différentes solutions d'enveloppe, chacune de ces variantes seront étudiées avec l'utilisation des brises soleil orientables, le bouclier ne sera pas utilisé puisque il ne s'adapte pas bien au fonctionnement de ses variantes.

Double peau

Mur Trombe-Michel

Mur Trombe-Michel Actif

Fenêtre pariétodynamique

La solution de référence qui a été utilisé dans cette partie et la variante avec des protections solaires BSO, elle a été présentée dans la section, 5.3.1.

5.5.1 Double peau

Ce principe de construction est apparu dans les années 70, suite au premier choc pétrolier, l'intérêt était de créer une zone tampon entre le bâtiment et l'extérieur pour diminuer les déperditions du bâtiment, de plus, l'air pour la ventilation circule tout d'abord dans cette cavité pour être préchauffé. De ce fait, cette solution permet de diminuer la demande énergétique du bâtiment par rapport à un système simple flux classique mais aussi car la double peau permet aussi de diminuer les déperditions. La température des parois vitrées intérieures est plus importante ce qui favorise le confort des occupants.

Pour la modélisation nous avons pris notre modèle de référence pour lequel nous avons modifié l'enveloppe. Une zone adjacente à chaque bureau a été construite. Celle-ci est caractérisée par un simple vitrage coté extérieur et un espacement de 1 m, un double vitrage sépare les deux zones, les caractéristiques des vitrage sont montrés dans le tableau 55. Nous avons défini une protection solaire type BSO dans la face intérieure du vitrage extérieur, qui se déploie avec un rayonnement solaire supérieur à 100 W/m². Pour la ventilation, nous avons défini une ventilation simple flux, la prise d'air est faite dans la double peau, chaque bureau bénéficie d'une entrée d'air d'une surface de 480 cm². Dans la figure 242 un schéma de la double peau est présenté.

Tableau 55. Caractéristiques vitrage

	Vitrage extérieur	Vitrage intérieur
U [W/m ² K]	1.5	1.1
FS	0.8	0.61
TL	0.8	0.8

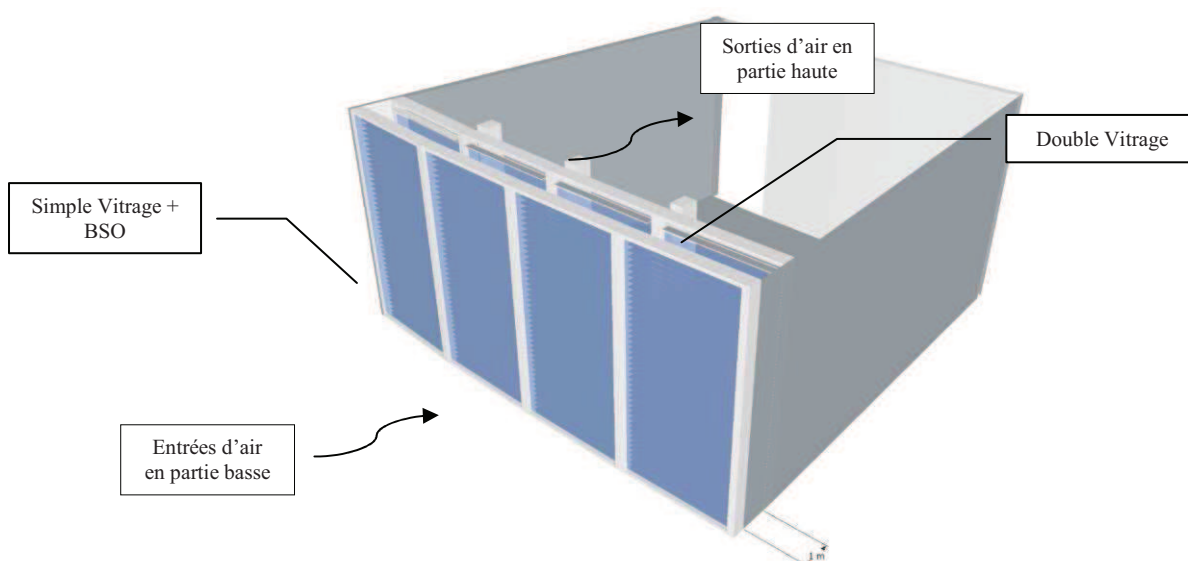


Figure 242. Schéma fonctionnement mode de ventilation de la double peau

5.5.1.1 Cas hiver

Nous avons défini des entrées d'air sur la façade extérieure (partie basse) et sur la façade intérieure (partie haute). L'air circule à travers la double peau, il se réchauffe et rentre ensuite à l'intérieur du bâtiment. Une ventilation simple flux par extraction a été définie pour assurer la bonne circulation de l'air. Le scénario de fonctionnement est le même que celui du cas de référence. Pour le recyclage, nous avons défini un arrêt de la ventilation, le système de chauffage continue à fonctionner avec le même scénario.

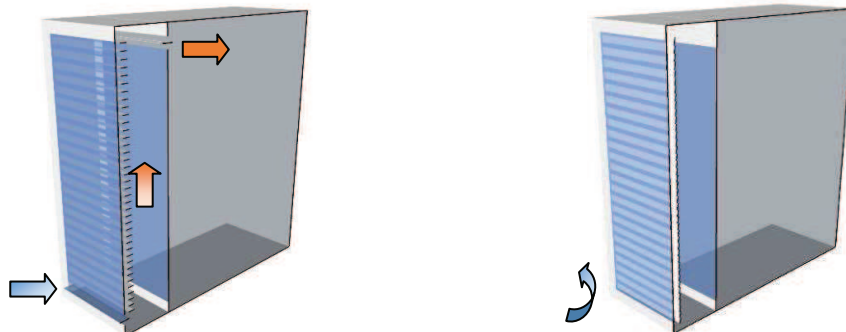


Figure 243. Mode de fonctionnement ventilation de la double peau en hiver

Deux modes de fonctionnement ont été définis. Le premier jour d'hiver, où les entrées d'air en façade sont ouvertes, l'air est préchauffé dans la cavité, double peau, avant de rentrer dans le bâtiment, les protections solaires, BSO, sont positionnées à 90°. Le deuxième nuit d'hiver, où les protections solaires ainsi que les entrées d'air sont fermées pour limiter les déperditions vers l'extérieur et éviter que l'air frais ne rentre dans le bâtiment.

Indicateurs QEI – semaine hiver

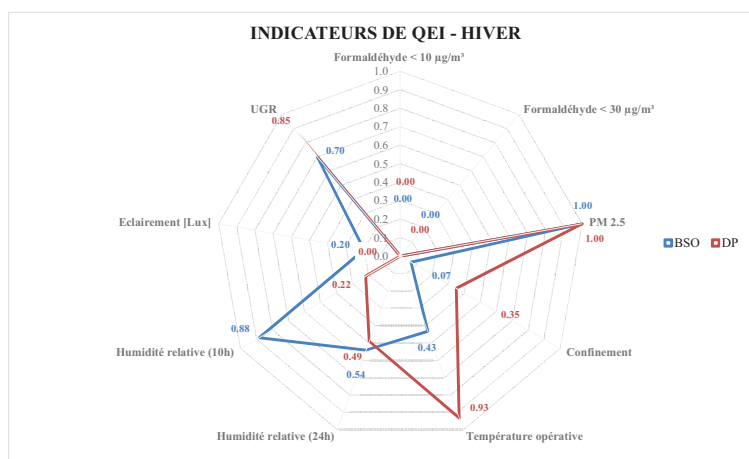


Figure 244. Indicateurs QEI variante 14 – Cas hiver

Au niveau des indicateurs QEI plusieurs améliorations sont observées. Au niveau du confort thermique le gain est considérable, l'indicateur évolue de 0.43 à 0.93. Le risque à l'éblouissement est très faible (0.85), la doubleau peau limite les apports solaires et permet de mieux gérer l'éblouissement, en revanche nous observons une diminution nette de l'indicateur éclairage, la demande en éclairage sera donc plus importante. L'indicateur de confinement est aussi meilleur, il est de 0.35 contre 0.07, et cela malgré un fonctionnement par intermittence de la ventilation. Seul l'indicateur de l'humidité présente un résultat moins intéressant car l'air est pris directement de l'extérieur.

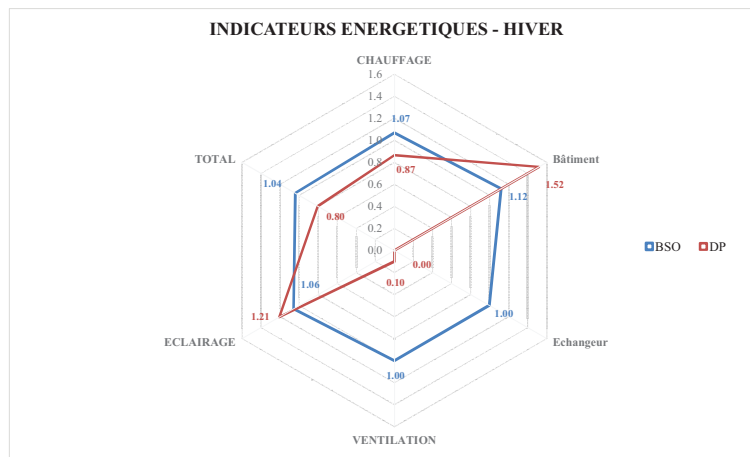


Figure 245. Indicateurs énergétiques variante 14 – Cas hiver

Au niveau de la demande énergétique globale, nous pouvons constater une diminution assez importante. Par rapport à la solution BSO, nous pouvons observer le gain énergétique dû à l'utilisation d'une double peau, la demande en chauffage est moins importante ce qui permet de faire de grandes économies. Le système de ventilation simple flux permet de réaliser des économies puisqu'un seul ventilateur est utilisé et le fonctionnement par intermittence permet de diminuer fortement la demande. Au niveau de l'éclairage la demande augmente du fait de la double peau et les BSO, nous avons vu que le niveau d'éclairement était assez faible en dessous de 500 lux, la double peau pénalise la demande liée à l'éclairage.

5.5.1.2 Cas été

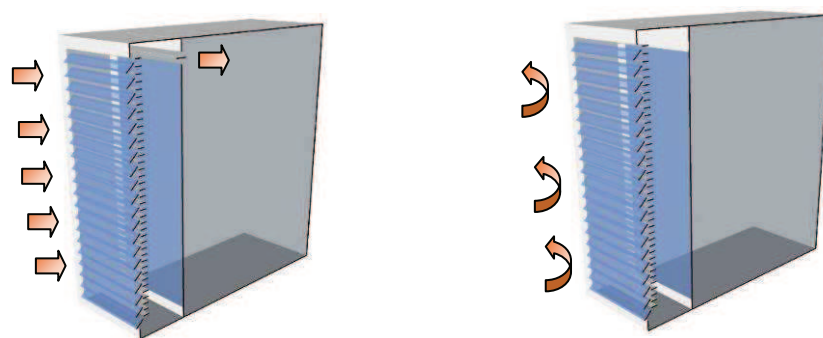


Figure 246. Schéma de fonctionnement de la double peau en été

En été, nous avons défini deux scénarii de fonctionnement. Pendant la journée (7-19h), les entrées d'air tout au long du vitrage sont ouvertes, pour créer une ouverture équivalente à 90% de la surface. Cela permet de brasser l'air à l'intérieur de la double peau afin d'éviter une possible surchauffe. Pendant la nuit ou le weekend, les entrées d'air en façades restent ouvertes (90% de la surface) pour évacuer les calories accumulées.

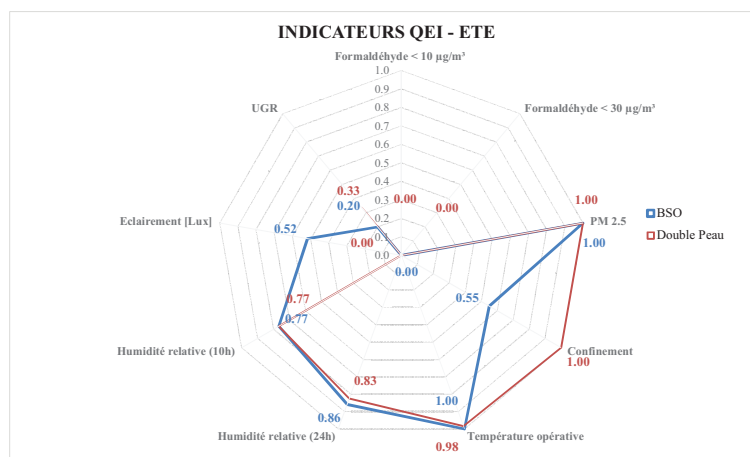


Figure 247. Indicateurs QEI variante 14 – Cas été

La variante double peau pour le cas été, montre des résultats moins intéressants. Au niveau du confort thermique nous observons une légère dégradation du confort 0.98 contre 1.00. L'indicateur de confinement présente une évolution intéressante du certainement à un brassage plus important. Le risque d'éblouissement diminue légèrement de 0.2 à 0.33 malgré une diminution importante de l'éclairement reçu. Pour le reste des indicateurs nous n'observons pas de différences significatives.

Indicateurs énergétiques – semaine été

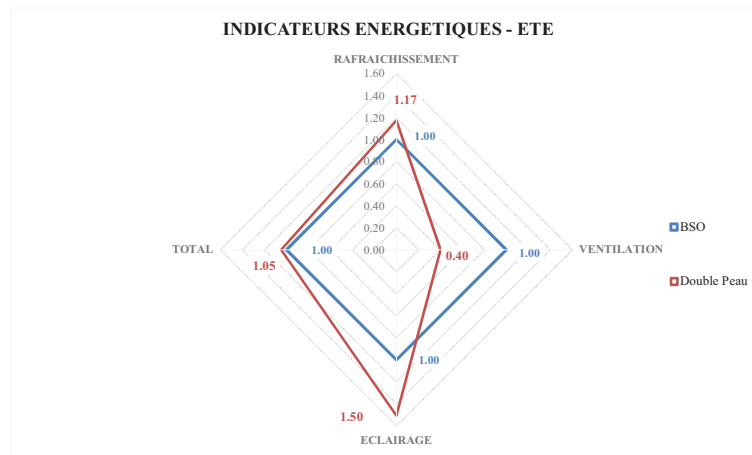


Figure 248. Indicateurs énergétiques variante 14 – Cas été

Au niveau énergétique, malgré une forte augmentation de la demande en éclairage, cette solution présente un bilan identique au cas de référence. Entre la solution BSO et Double Peau, nous pouvons observer une demande en froid plus importante, du fait que l'air se préchauffe légèrement dans la double peau avant de rentrer dans le bâtiment. Le gain le plus important est observé au niveau de la ventilation.

Conclusion

Cette variante double peau présente de nombreux avantages par rapport à la solution de référence. Pour le cas hiver, nous avons constaté une amélioration considérable du confort thermique. Le confort visuel présente une évolution intéressante du fait de la combinaison d'un double vitrage et un simple vitrage. La demande énergétique est plus faible par rapport au cas de référence, le gain le plus important est fait au niveau de la ventilation. L'utilisation d'un seul ventilateur permet de diminuer la demande. En revanche, nous avons constaté une augmentation de la demande liée à l'éclairage.

Pour le cas été, les indicateurs de confort thermique, du confinement et du confort visuel présentent des évolutions assez intéressantes. La double peau permet une meilleure maîtrise des apports solaires. En revanche, au niveau de la demande énergétique, nous avons observé une demande légèrement plus importante. L'air pris dans la double peau pour la ventilation, est légèrement chauffé impactant la demande en froid. De la même manière que pour le cas hiver, la demande en éclairage est plus importante.

5.5.2 Le mur capteur (Mur Trombe-Michel)

Ce système a été proposé pour la première fois par le zoologiste Edward Morse (1838-1925) en 1881. Ce n'est qu'en 1960 que le professeur Felix Trombe (1906-1985) et l'architecte Jacques Michel l'ont développé. Le principe de fonctionnement de ce mur, aussi connu sous le nom de Mur Trombe-Michel, repose sur le captage des rayonnements solaires sur un mur opaque (noir), un effet de serre est créé en ajoutant un vitrage devant ce mur. La chaleur est ensuite restituée par convection naturelle.

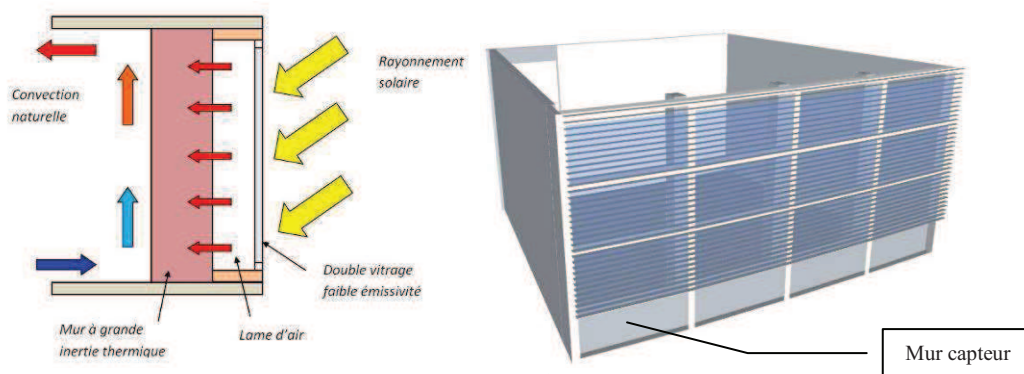


Figure 249. Mur Capteur

Pour la modélisation, nous avons pris le modèle de référence (BSO) auquel nous avons remplacé l'allège en bois, partie basse de la façade, par un mur trombe. Ce mur est composé d'une partie en béton peint en noir coté intérieur et d'un simple vitrage coté extérieur. Des protections solaires du type BSO ont été ajoutées au mur pour une meilleure gestion. Dans cette solution, la ventilation est faite à partir des entrées d'air placées dans les vitrages. Le mur trombe chauffe le bâtiment par convection naturelle.

5.5.2.1 Cas hiver

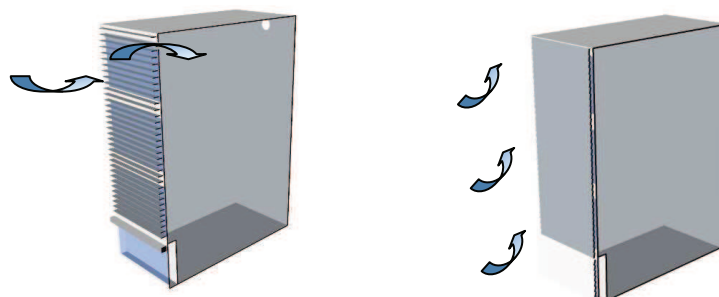


Figure 250. Schéma de fonctionnement du Mur Trombe Michel

Pour la modélisation des protections solaires du mur, nous avons défini deux scénarii, jour d'hiver où les protections sont complètement ouvertes pour profiter des apports solaires au maximum. Nuit d'hiver, où les protections solaires sont fermées pour diminuer les déperdition vers l'extérieur. Pour la ventilation, nous avons défini une entrée d'air dans chaque fenêtre haute d'une surface de 144 cm², une extraction centralisée permet de réaliser la ventilation des bureaux.

Indicateurs QEI – semaine hiver

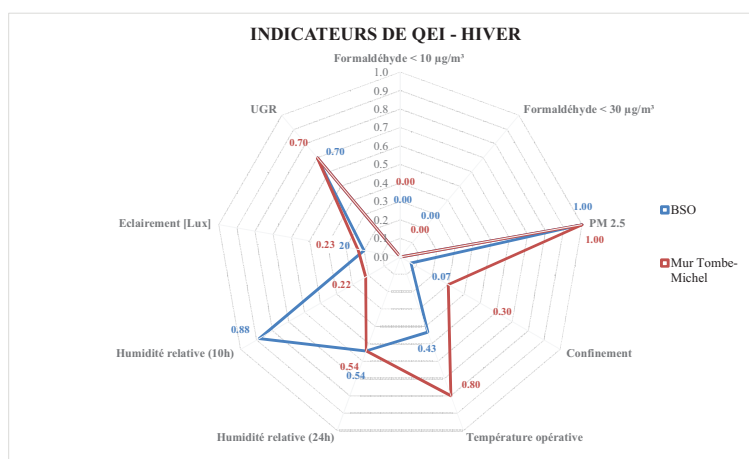


Figure 251. Indicateurs QEI variante 15 – Cas hiver

Le mur Trombe-Michel permet d'améliorer le confort thermique l'indicateur évolué de 0.43 à 0.80 par rapport au cas de référence. La capacité du mur à stocker l'énergie, permet d'augmenter les températures opératives. L'indicateur de confinement a aussi évolué de 0.07 à 0.30 qui s'explique par des taux de renouvellement d'air plus important. Seul le confort humidité est dégradé à cause des taux de renouvellement d'air plus importants, l'air est pris directement de l'extérieur.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

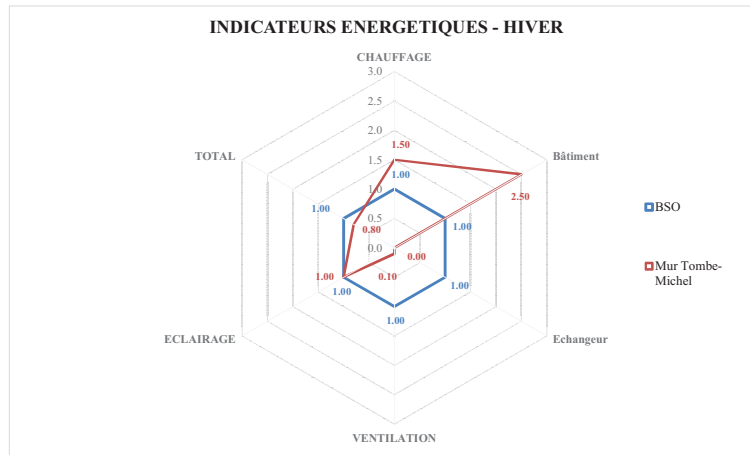


Figure 252. Indicateurs énergétiques variante 15 – Cas hiver

Cette variante permet de diminuer la demande énergétique totale, malgré une augmentation au niveau du chauffage. Les déperditions par la ventilation sont plus importantes du fait de la ventilation simple flux ce qui modifié le demande de chauffage. Le gain le plus important vient de la ventilation.

5.5.2.2 Cas été

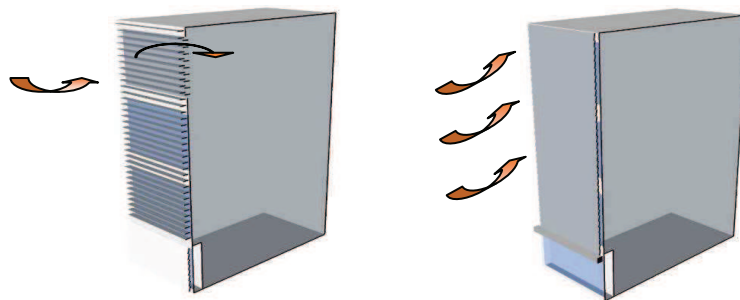


Figure 253. Schéma de fonctionnement Mur Trombe Michel cas été

Pour la modélisation des protections solaires du mur trombe, nous avons défini deux scénarii, jour d'été où les protections sont fermées pour limiter la surchauffe dans la cavité. Nuit d'été, où les protections solaires sont ouvertes pour évacuer par conduction et convection, la chaleur cumulée pendant la journée. Pour la ventilation, nous avons défini une entrée d'air dans chaque fenêtre haute d'une surface de 144 cm², une extraction centralisée permet de réaliser la ventilation des bureaux.

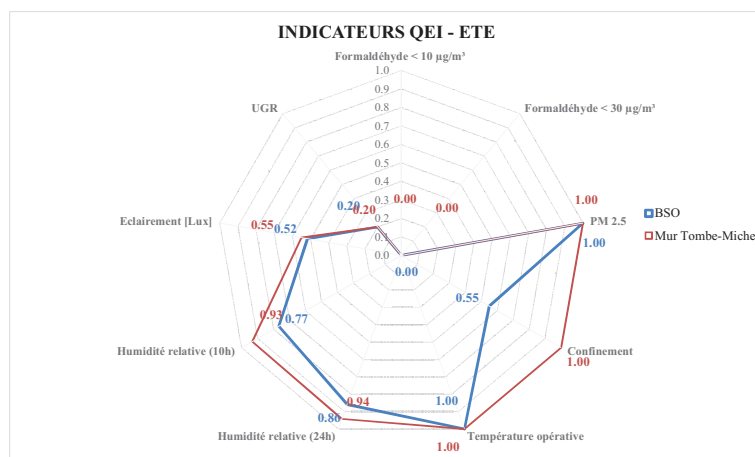


Figure 254. Indicateurs QEI variante 15 – cas été

De manière générale, les indicateurs ne présentent pas d'évolution. Seul l'indicateur confinement est plus intéressant du fait de la ventilation simple flux. Les entrées d'air en façade permettent un renouvellement d'air plus important.

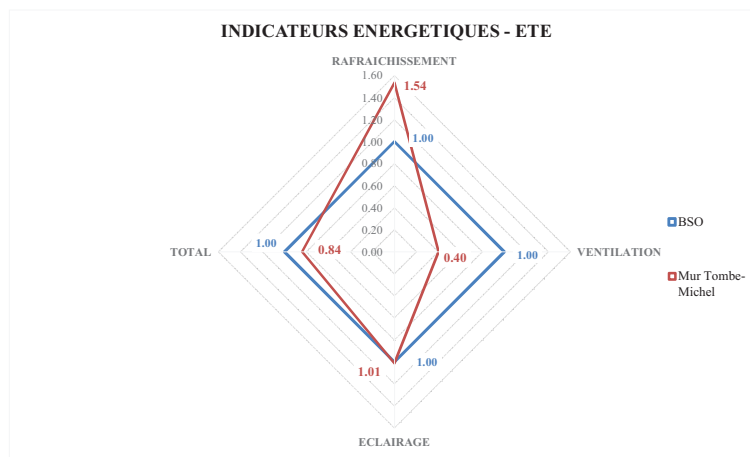


Figure 255. Indicateurs énergétiques variante 15 – cas été

Malgré un taux de renouvellement plus important nous pouvons observer une augmentation de la demande de froid par rapport au cas de référence. Malgré les protections solaires, le mur trombe proposée dans cette variante, cumule de l'énergie qui se retrouve dans l'air intérieur. Les économies réalisées viennent, donc uniquement de la ventilation ce qui a permis de réduire la demande totale d'énergie par rapport au cas de référence (BSO).

Conclusion

Le mur trombe proposé ici, présente un avantage pour un fonctionnement hiver. Malgré une demande en chauffage plus importante, du fait de la ventilation simple flux, nous pouvons constater une amélioration du confort thermique intérieur. Le mur capte les calories et les restituent à l'intérieur.

Pour le cas estival, nous n'avons pas observé des gains particuliers. Le seul avantage est donc, lié à la ventilation, l'utilisation d'une ventilation simple flux permet de faire des économies.

5.5.3 Le mur trombe-Michel Actif

Utilise le même principe que le mur Trombe en ajoutant une circulation d'air à l'intérieur. Grâce à des clapets situés en partie basse (coté extérieur) et haute du mur (coté intérieur), l'air pour la ventilation est pris dans cette cavité. Un système de ventilation par extraction est utilisé dans cette variante.

5.5.3.1 Cas hiver

Pour la modélisation, nous avons utilisé le même modèle que précédemment, nous avons simplement supprimé les entrées d'air dans les fenêtres et nous les avons remplacé par une entrée d'air dans chaque trame de mur Trombe. La ventilation a le même fonctionnement que dans le cas de référence. Le recyclage a été remplacé par l'arrêt de la ventilation, le chauffage présente le même scenario de fonctionnement.

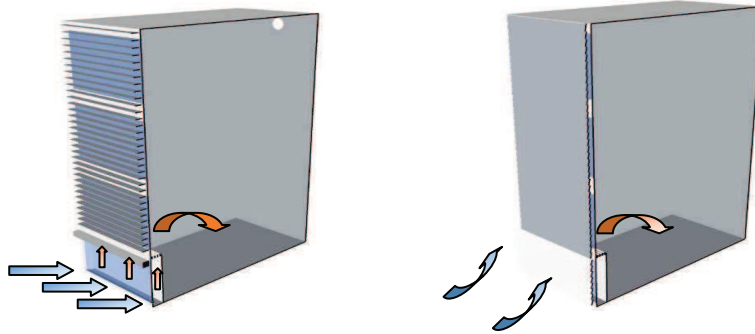


Figure 256. Schéma de fonctionnement du Mur Trombe Michel Actif mode hiver

Deux modes ont été définis, la journée l'air circulé à travers cette cavité, il est préchauffé et ensuite rentre dans chaque bureau, les BSO sont complètement ouverts pour profiter au maximum des apports solaires. La nuit, les entrées d'air coté extérieur sont fermées. Le fonctionnement des BSO coté façade est identique que dans la variante proposé dans la section 5.3.2.

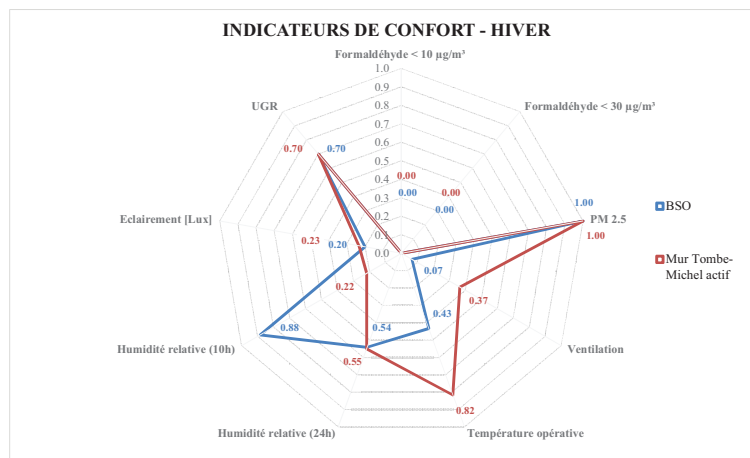


Figure 257. Indicateurs QEI variante 16 – Cas hiver

La variante mur trombe actif présente des avantages par rapport à la solution BSO. Au niveau du confort thermique, l'indicateur évolué de 0.43 à 0.82, du fait d'un préchauffage de l'air et du stockage des calories réalisé dans le mur. Au niveau de l'indicateur de confinement, nous pouvons observer un gain mais qui s'explique par le fait que les entrées d'air que nous avons modélisées permettent un renouvellement plus important. Seul l'indicateur de l'humidité 10h présente une dégradation, d'un renouvellement d'air plus important.

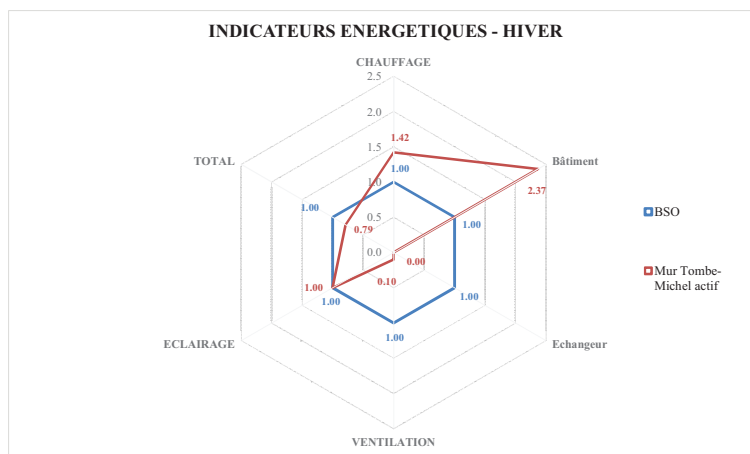


Figure 258. Indicateurs énergétiques variante 16 – Cas hiver

Au niveau de la demande énergétique, nous pouvons constater un gain énergétique avec cette solution malgré une demande en chauffage plus importante. Le gain le plus important est réalisé au niveau de la ventilation, ce qui permet de réduire de manière globale la demande énergétique. Par rapport à la variante mur Trombe, nous pouvons observer une diminution de la demande de chauffage, le préchauffage fait au niveau du mur permet de réduire la demande. L'indicateur passe de 1.5 à 1.42.

Cas été

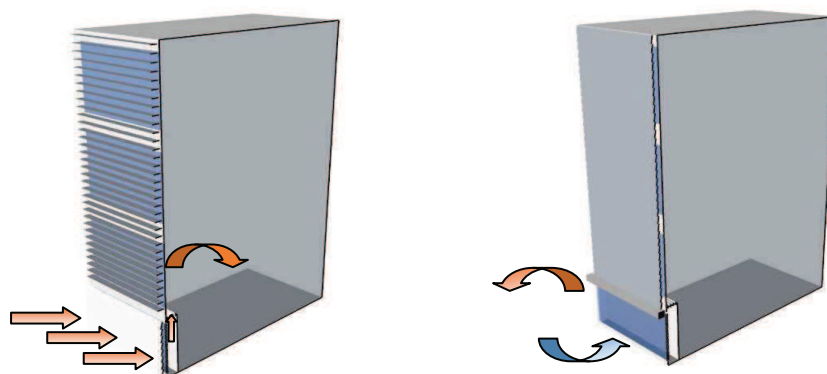


Figure 259. Schéma de fonctionnement du Mur Trombe Michel mode été

La journée, les protections solaires du mur capteur restent fermées, pour éviter une surchauffe, le ratio d'ouverture pour la ventilation est défini à 90% de la surface totale, pour brasser suffisamment d'air et maintenir la température fraîche à l'intérieur du mur. ($T_{int} = T_{ext}$). La nuit, les entrées d'air du mur côté extérieur ainsi que les protections solaires restent ouvertes pour libérer les calories stockées. Pour l'analyse de résultats nous prendrons comme référence la variante BSO.

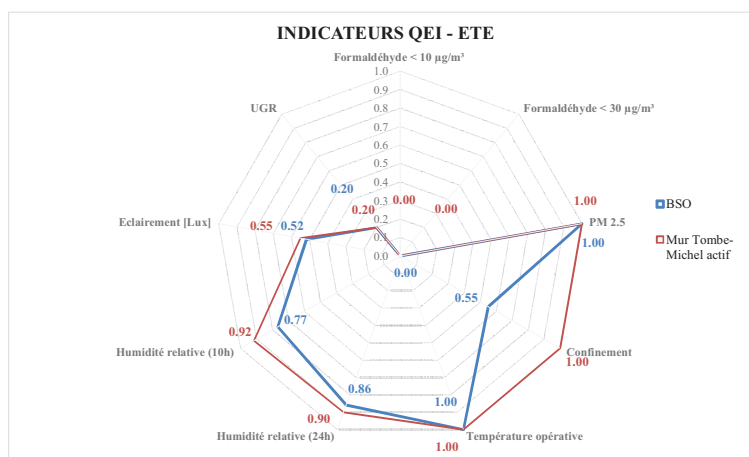


Figure 260. Indicateurs QEI variante 16 – Cas été

De manière générale peu d'évolutions sont observées dans les indicateurs QEI. Seul le confinement présente une évolution intéressante, du fait des entrées d'air en façade et une ventilation simple flux. Au niveau des indicateurs d'humidité une évolution est observée, les valeurs sont plus importantes.

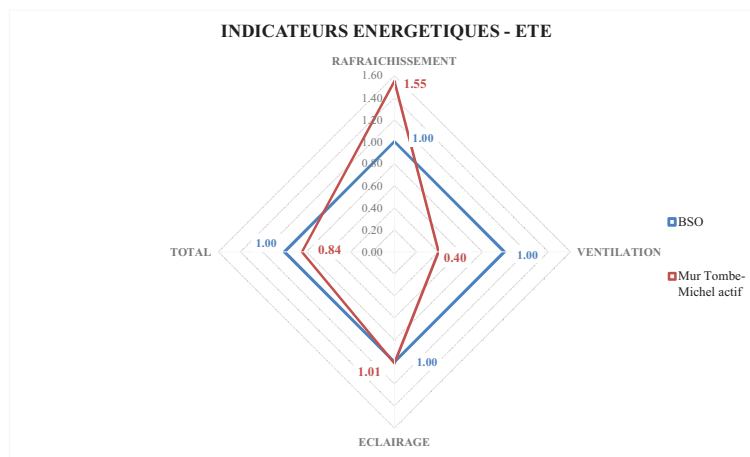


Figure 261. Indicateurs énergétiques variante 16 – Cas été

Au niveau de la demande énergétique nous observons une diminution par rapport à la solution de référence (BSO). Le gain le plus important est observé au niveau de la ventilation, l'utilisation d'un système de ventilation par simple extraction permet de réaliser des économies, qui permettent de compenser la demande plus importante en froid.

Conclusion

Le mur Trombe actif, trouve son intérêt pour un fonctionnement hiver. La récupération des calories fait dans le mur permet de préchauffer l'air pour la ventilation, diminuant ainsi la demande énergétique du chauffage par rapport à un mur trombe sans ventilation. Le confort thermique d'hiver est aussi plus intéressant grâce au stockage des calories fait dans le mur.

Pour un fonctionnement en été, cette variante, ne présente pas de grands avantages, le seul avantage est lié à la ventilation. Le couplage de cette technique avec un système de ventilation simple flux par extraction permet de faire des économies importantes.

5.5.4 Fenêtre pariétodynamique

Ce principe a été inventé par l'architecte Jacques PAZIAUD en 1978, suite au premier choc pétrolier. Le fonctionnement est similaire à double peau, récupérer la chaleur perdue, par conduction, et l'énergie du soleil pour préchauffer l'air extérieur. A différence de la double peau, une surface plus petite peut être dimensionnée, la chaleur est récupérée directement dans la fenêtre pour ensuite faire rentrer l'air. L'air circule tout au long des cavités vitrées, la chaleur emmagasinée préchauffe l'air avant qu'il rentre dans le bâtiment. Le flux perdu par le bâtiment et le rayonnement solaires chauffent naturellement l'air extérieur.

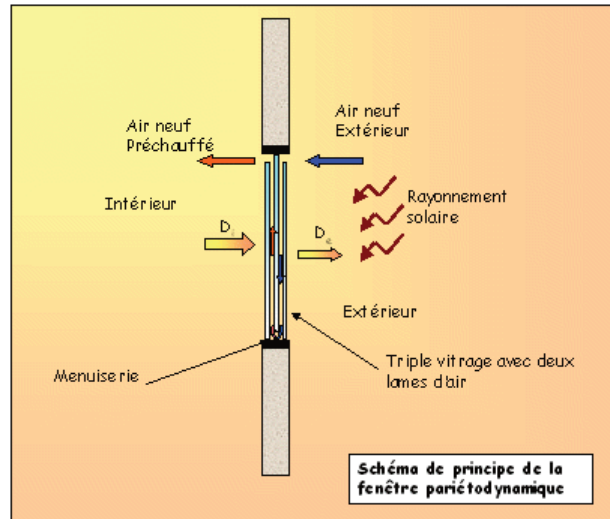


Figure 262. Fonctionnement de la fenêtre pariétodynamique

Pour la modélisation, nous avons pris le modèle de référence et avons remplacé chaque vitrage par une fenêtre pariétodynamique. Les protections solaires utilisées sont du type BSO, nous n'avons pas conservé le bouclier puisque sa forme fixe ne s'adapte pas à la cette fenêtre, en cause sa forme fixe.

5.5.4.1 Cas hiver

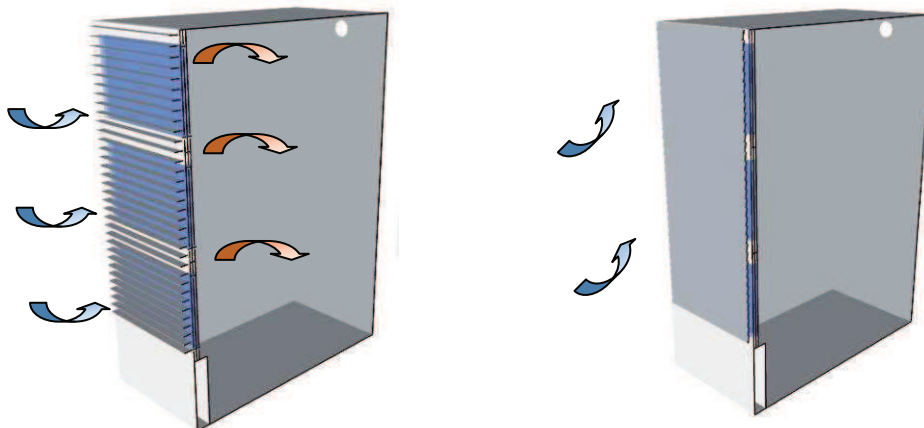


Figure 263. Schéma de fonctionnement de la fenêtre pariétodynamique mode hiver

Le fonctionnement des protections solaires est identique à la variante BSO. La ventilation dans cette variante est faite par les fenêtres. Des entrées d'air dans chaque fenêtre couplé avec une ventilation simple flux par extraction permet de réaliser la ventilation du bâtiment.

Indicateurs QEI – semaine hiver

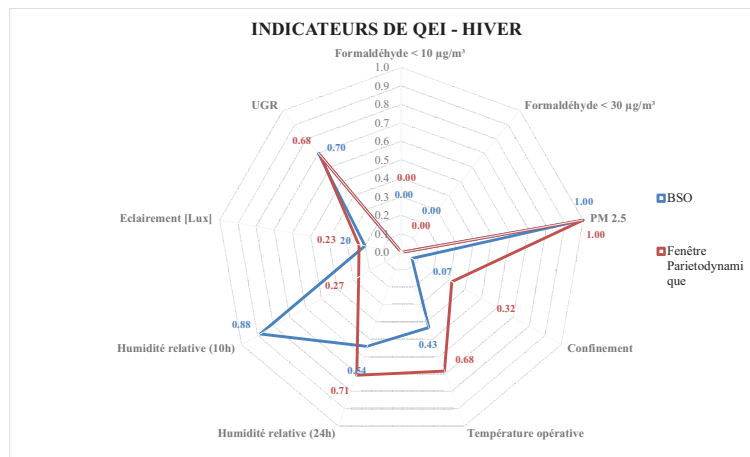


Figure 264. Indicateurs QEI variante 17 – Cas hiver

Les résultats montrent une amélioration au niveau du confort thermique, de l'humidité 24h et du confinement. En revanche, l'indicateur humidité 10h est bien dégradé par rapport au cas de base. Pour le reste des indicateurs nous n'observons pas des différences.

Indicateurs énergétiques – semaine hiver

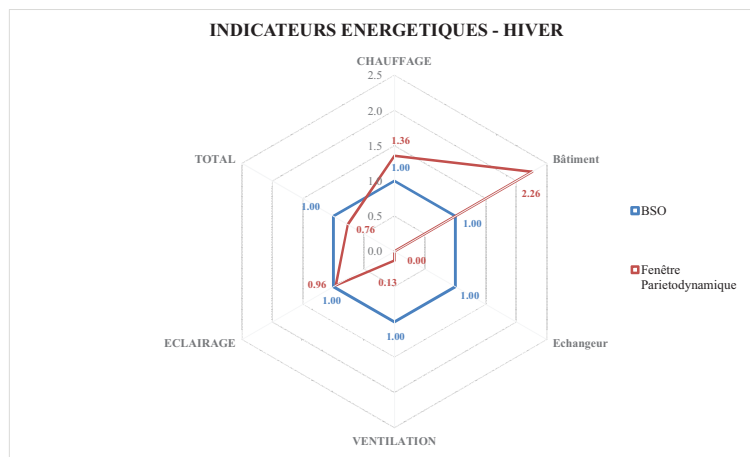


Figure 265. Indicateurs énergétiques variante 17 – Cas hiver

Au niveau du chauffage, la demande est plus importante puisque d'une part les débits d'air sont plus importants et d'autre part, le préchauffage de l'air est moins intéressant par rapport à une solution double flux avec récupération. Au niveau de l'éclairage, la demande est plus faible puisque le rayonnement solaire qui traverse le vitrage est plus important. Le gain le plus conséquent est observé au niveau de la ventilation, nous avons modélisé un système composé d'un ventilateur auquel nous avons défini un fonctionnement par intermittence, ce qui permet de réaliser de grandes économies. Cela a permis de diminuer la demande totale de manière conséquente, tout en améliorant le confort et la qualité de l'air.

5.5.4.2 Cas été

Le fonctionnement de la ventilation est identique au cas hiver. L'air circule à travers les fenêtres pour ensuite rentrer dans le volume. Les protections solaires permettent de gérer les apports solaires pour éviter que l'air ne se préchauffe.

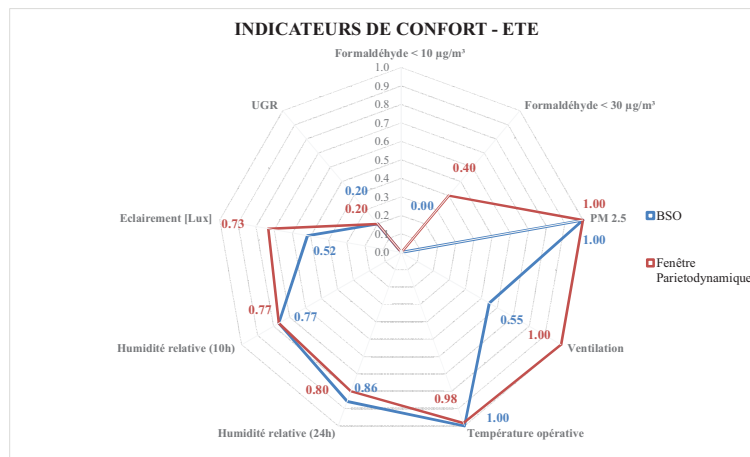


Figure 266. Indicateurs QEI variante 17 – Cas été

Au niveau de l'éclairement nous pouvons observer un indicateur plus intéressant, le facteur lumineux du vitrage est plus important tout en conservant le risque d'éblouissement. Au niveau de la ventilation, nous pouvons observer une amélioration liée aux débits plus importants. Nous avons cherché, comme dans le cas précédent, des indicateurs de ventilation égaux, pour garantir un taux de renouvellement identique. Cela a impacté l'indicateur de formaldéhyde. La modélisation de ce système ne tient pas compte des effets liés au vent, comme pour les autres variantes, la modélisation de la ventilation est plus proche d'un système double flux ce qui permet d'avoir une distribution des valeurs plus uniforme.

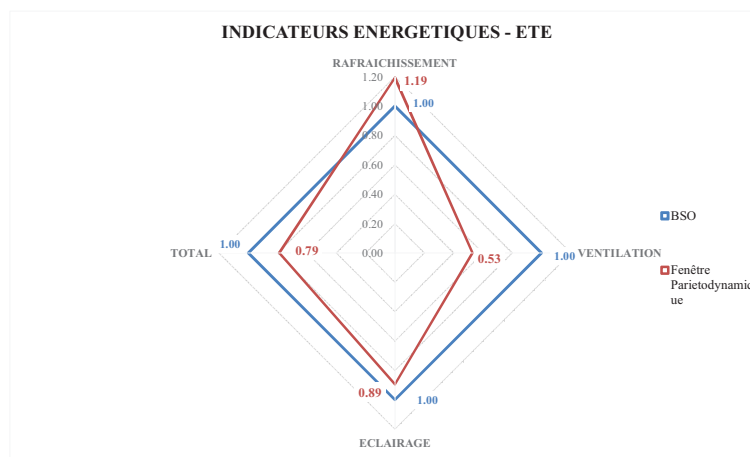


Figure 267. Indicateurs énergétiques variante 17 – Cas été

Au niveau de la demande énergétique totale, la solution fenêtre pariétodynamique permet de réaliser des économies. Au niveau du froid, nous constatons une augmentation qui est liée à des apports solaires plus importants. Nous observons des gains intéressants au niveau de l'éclairement et de la ventilation. L'utilisation d'une ventilation simple flux et un vitrage moins performant permet de faire des économies qui sont significatives par rapport à la solution BSO.

6. SYNTHESE

6.1 Vitrage

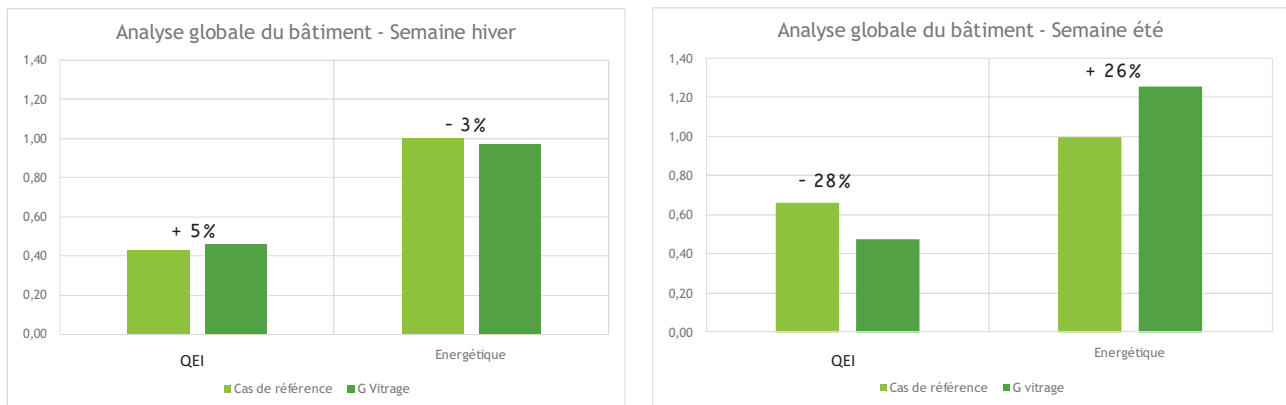


Figure 268. Synthèse vitrage

La modification faite au niveau des caractéristiques du vitrage a permis d'améliorer le confort et la performance énergétique pendant la semaine d'hiver. En revanche, pour le cas été cette solution n'est pas intéressante ni du point de vue de la QEI ni de la performance énergétique.

6.2 Ventilation

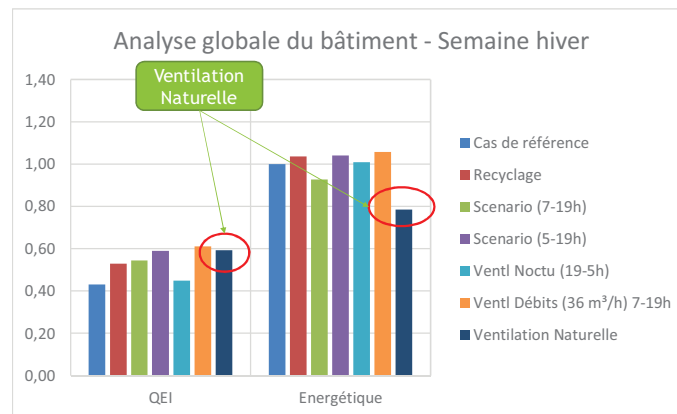


Figure 269. Synthèse ventilation – cas hiver

Au niveau de la ventilation, nous pouvons observer que c'est la ventilation naturelle qui permet d'améliorer l'indicateur de la QEI tout en diminuant considérablement la demande énergétique. Cette observation est aussi valable pour le cas été.

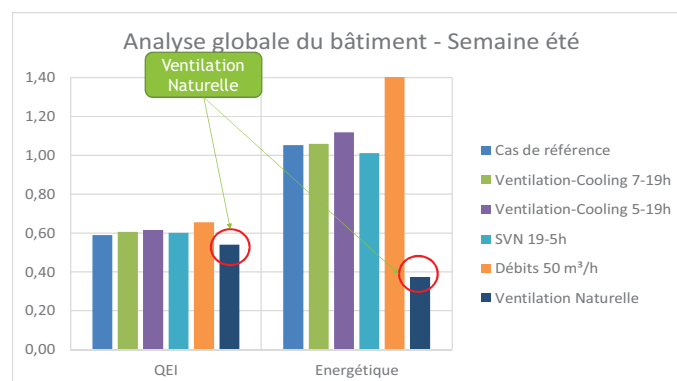


Figure 270. Synthèse ventilation – cas été

6.3 Protections solaires

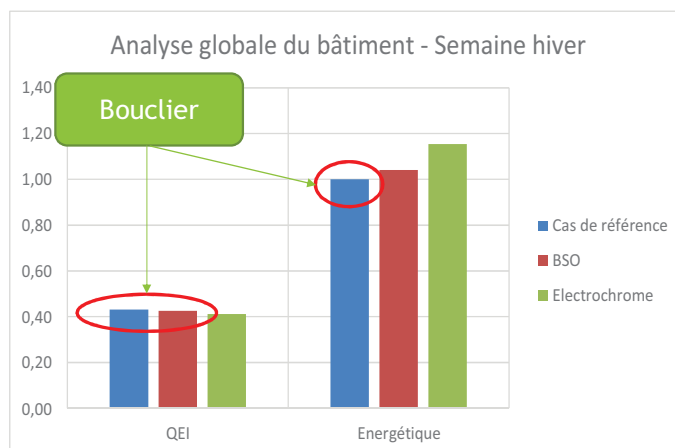


Figure 271. Synthèse protections solaires – cas hiver

Concernant les protections solaires, nous pouvons observer que la solution bouclier thermique permet de diminuer la demande énergétique tout en conservant un indice QEI équivalent par rapport aux autres solutions.

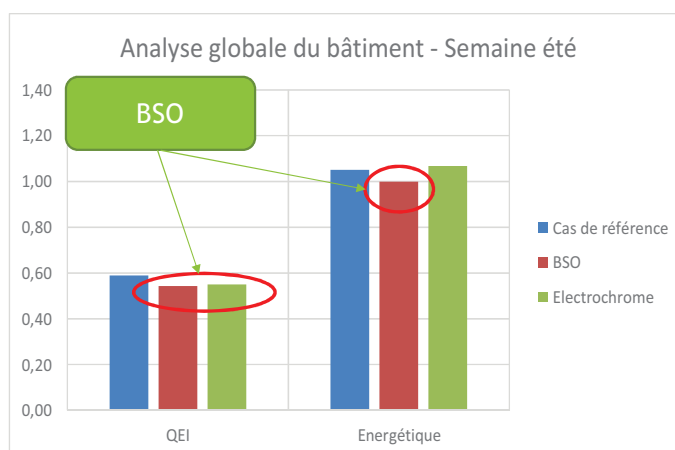


Figure 272. Synthèse protections solaires – cas été

Pour le cas été, c'est la solution Brise Soleil Orientable qui permet de diminuer la demande énergétique, en revanche au niveau de l'indice QEI elle reste équivalente. Le bouclier à différence des BSO ne demande une gestion puisque c'est une solution qui est fixe et son coût d'installation et opération est peut être plus intéressant.

6.4 Inertie

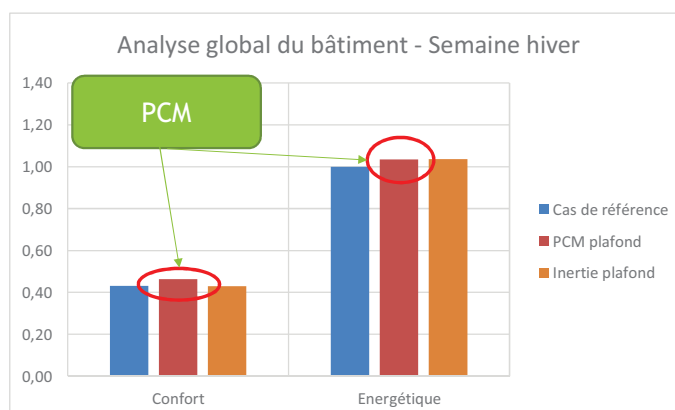


Figure 273. Synthèse inertie – cas hiver

Pour le cas hiver, la solution PCM ou avec des matériaux à changement de phase semble donner un meilleur compromis entre la demande énergétique et la QEI. Les PCM ou MCP permettent de réaliser un stockage de l'énergie qui est intéressant pour le cas hiver puisque les températures de surfaces sont plus importantes améliorant ainsi le confort thermique. En revanche, la demande énergétique est légèrement plus importante.

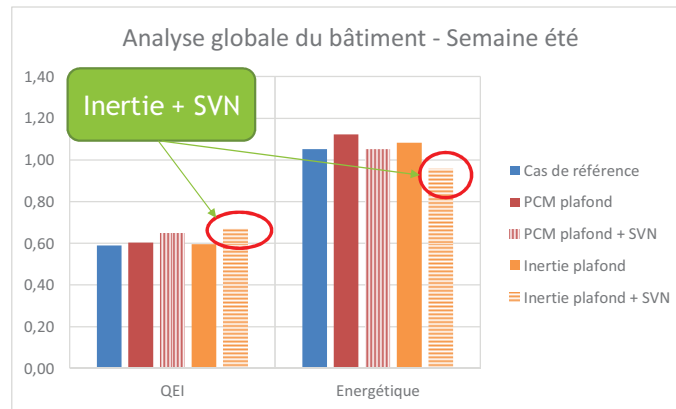


Figure 274. Synthèse inertie – Cas été

Pour le cas été, la solution inertie (béton) combinée avec une sur-ventilation naturelle nocturne, permet de réduire considérablement la demande énergétique et améliorer l'indice QEI. Cette variante est d'autant plus intéressante car elle se trouve dans les bâtiments, le béton est un matériau qui est présent dans la structure.

6.5 Enveloppe

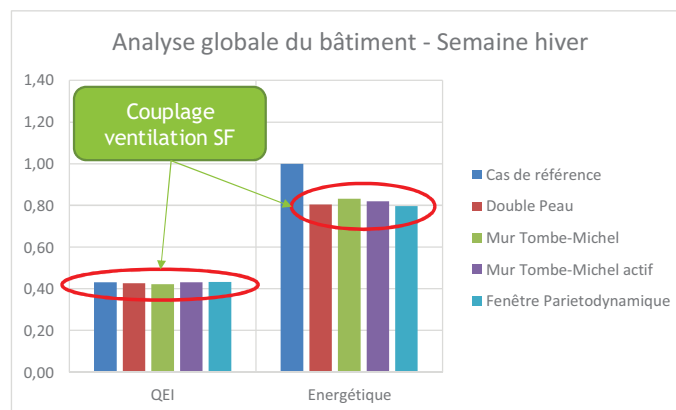


Figure 275. Synthèse enveloppe – cas hiver

Au niveau de l'enveloppe parmi toutes les variantes étudiées, nous pouvons observer que le couplage avec un mode de ventilation simple flux permet de faire des économies importantes au niveau énergétique. Toutes les variantes étudiées ici, double peau, mur trombe, fenêtre pariéto-dynamique, ont cette particularité.

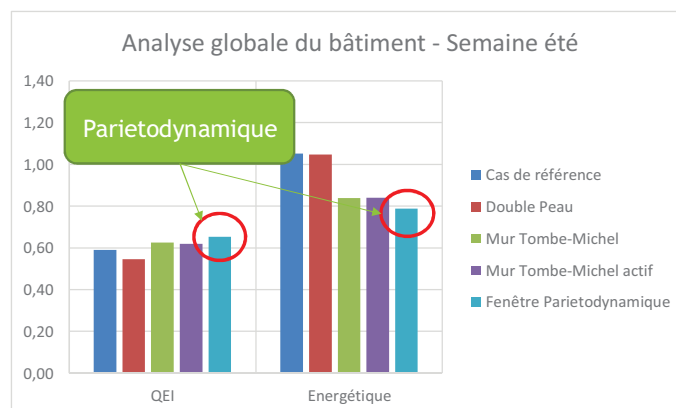


Figure 276. Synthèse enveloppe – cas été

Pour le cas été, la solution fenêtre pariéto-dynamique donne le meilleur compromis entre la QEI et la demande énergétique.

7. CONCLUSION

Nous avons présenté les résultats les différentes stratégies de performance, avec des résultats plutôt intéressants dans certains cas. Nous avons démontré que la demande énergétique peut être optimisée tout en améliorant la QEI.

Le modèle numérique que nous avons développé nous a permis d'observer l'évolution de la demande énergétique avec différentes modes de fonctionnement du bâtiment. Bien que ces résultats ne représentent pas l'ensemble du parc de bâtiments tertiaires, les résultats obtenus donnent une vision générale de différents modes de fonctionnement et comment ils peuvent impacter la demande du bâtiment.

Nous avons vu que d'autres solutions existent et qui peuvent apporter un gain énergétique considérable. La Tour Elithis à la base c'est un bâtiment qui affiche une consommation très faible. Même si le bilan énergétique est déjà intéressant, il est toujours possible de faire des économies grâce à des stratégies très simples.

L'utilisation des critères de QEI a permis d'évaluer la performance du bâtiment d'une autre manière. Très souvent, la performance d'un bâtiment est mesurée simplement en termes énergétiques, avec le travail que nous avons fait, nous proposons une méthode qui va permettre d'analyser les bâtiments sur sa performance globale.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse a été de proposer et d'analyser différentes stratégies de fonctionnement pour les bâtiments de bureaux à faible demande énergétique. Ces stratégies ont été proposées dans l'optique d'établir une démarche d'amélioration de la performance énergétique mais surtout de la Qualité des Environnements Intérieurs (QEI) de ces bâtiments.

Dans la première partie de notre travail, nous avons évoqué la problématique actuelle autour de la performance énergétique des bâtiments et des enjeux sanitaires et économiques liés à la qualité des ambiances intérieures. Nous avons défini la QEI et les paramètres qu'à ce jour permettent l'analyse et la quantification de celle-ci.

Nous avons constaté très rapidement qu'en France l'étude de la performance d'un bâtiment est souvent limitée au bilan énergétique de celui-ci. Comme c'est le cas de la Réglementation Thermique qui est considérée comme un outil complet pour l'évaluation de la performance d'un bâtiment mais qui ne reconnaît pas la QEI comme faisant partie de cette évaluation. En effet, à ce jour, aucun outil de calcul n'intègre la QEI dans un calcul global de performance d'un bâtiment. La Qualité de l'Environnement Intérieur est un sujet qui depuis un certain temps intéresse de plus en plus les concepteurs et les chercheurs. Nous avons présenté quelques études de cas des bâtiments performants où les critères de QEI avaient été partiellement intégrés. Les démarches environnementales telles que le LEED, BREEAM et HQE proposent dans leurs définitions une méthode pour l'intégration des critères de QEI. En revanche, ces démarches n'étant pas obligatoires pour la construction d'un bâtiment, l'évaluation de QEI est loin d'être intégrée de façon systématique à la conception des bâtiments.

Un faible nombre de données existe sur le retour d'expérience et sur le suivi de la QEI et des consommations en énergie des bâtiments de bureaux. De ce fait, l'analyse de la QEI dans les bâtiments de bureaux constitue un travail complexe avec des incertitudes et des sources d'erreur considérables. Des projets collaboratifs au niveau Européen sont actuellement en cours mais les résultats ne sont pas encore disponibles. Pour toutes ces raisons, nous nous sommes intéressés à la Tour Elithis, premier bâtiment à énergie positive de France avec des performances énergétiques remarquables. Nous avons disposé d'un modèle réel sur lequel, un suivi détaillé non seulement des consommations énergétiques mais aussi du confort thermique et de la Qualité de l'air, nous a permis d'établir un modèle d'étude fiable et représentatif de la réalité actuelle. Nous avons développé ce modèle basé sur nos observations et sur les données de différents suivis, nous avons fait une validation en termes de besoins chauds et froids, malgré les différences observées nous avons construit un modèle fiable pour l'analyse de stratégies de performance.

Ce modèle nous a permis de constater et de démontrer qu'un bilan énergétique correct n'est pas systématiquement synonyme de performance si les exigences de confort et de QAI ne sont pas assurées.

Sur la base des observations faites sur les différents modes de fonctionnement du bâtiment, nous avons défini les stratégies d'amélioration et d'optimisation de la performance globale de celui-ci. Ces stratégies relèvent des modifications généralement proposées pour l'optimisation d'un bâtiment. Ce travail de thèse ne cherche pas à créer et/ou développer des solutions innovantes. L'objectif est de quantifier l'impact des solutions couramment utilisées sur la notion relativement récente de QEI. Nous avons présenté les différentes relations qui peuvent exister entre la QEI et l'efficacité énergétique avec, comme souhait principal, que l'importance de la QEI dans la conception des bâtiments d'aujourd'hui et de demain soit incluse à sa juste valeur.

Avec le suivi de la QAI, nous avons observé la relation directe entre celle-ci et les saisons. Nous avons introduit la définition de Qualité de l'air saisonnière. Nous avons conclu quant à la relation entre la concentration de formaldéhyde et la température intérieure. En revanche, les modèles actuels ne permettent pas une prise en compte simplifiée de cette relation. Pour cette raison nous avons proposé une méthode de détermination de la concentration de formaldéhyde en fonction de la température radiante moyenne d'une pièce. L'application de cette méthode nous a permis d'obtenir des résultats intéressants et de valider nos modélisations pour les différentes stratégies proposées.

En ce qui concerne le confort, le suivi réalisé au moyen d'enquêtes nous a permis de conclure sur le niveau de satisfaction des différents critères d'évaluation. En revanche, la modélisation numérique de ces critères reste complexe. C'est pourquoi nous avons opté par une approche du confort en fonction de la température opérative. Cette dernière pouvant être calculée de manière simple et précise par l'outil de modélisation.

Une des principales observations faites est que la ventilation s'avère être le moyen le plus efficace pour réduire la pollution à l'intérieur des bâtiments mais inversement, son impact sur la performance énergétique est négatif.

Nous avons démontré qu'il est possible d'optimiser la QAI tout en conservant l'efficacité énergétique en intégrant des solutions techniques telles que la double peau, la fenêtre pariétodynamique, le mur Trombe, etc.

Une stratégie de ventilation qui malheureusement n'a pas connu un développement important en France est la ventilation naturelle. Il est important de rappeler que cette solution constitue le seul moyen pouvant optimiser la performance globale d'un bâtiment sans impact négatif sur aucun des critères d'évaluation. Sa mise en place nécessite un savoir-faire et une attention particulière lors de sa conception. Nous avons présenté quelques exemples d'intégration de cette solution avec des résultats très intéressants d'un point de vue de la performance globale des bâtiments.

Ce travail de thèse a permis de démontrer la relation entre QEI et efficacité énergétique, combiner ces deux critères est donc possible. Notre travail s'est limité à une analyse sur une période bien restreinte mais malgré cela nous avons pu observer des résultats intéressants qui donnent une base pour la réflexion et la conception pour les bâtiments de demain. Il est important de privilégier des systèmes de fonctionnement simples qui peuvent s'avérer plus intéressants pour la conception des bâtiments performants. L'utilisation de systèmes complexes avec des modes de régulation assez pointus ne font que compliquer la gestion du bâtiment avec un risque important de dégradation de la performance de celui-ci.

Toutes les méthodes et logiciels que nous avons utilisés pendant ce travail peuvent être utilisés et téléchargés sans aucune restriction. Les résultats présentés dans ce travail permettront de mieux aborder la problématique autour de la QEI et des performances globales des bâtiments. Ce que nous cherchons avec ce travail est de démontrer l'importance de l'intégration des critères de QEI dans l'évaluation des performances d'un bâtiment car les enjeux de santé et de bien-être des utilisateurs sont déterminants.

Ce travail de thèse a nécessité la mobilisation de plusieurs acteurs et d'un travail assez important. Il serait pertinent de créer des groupes de travail et d'éviter les actions ponctuelles. La recherche et l'industrie pourraient avancer plus rapidement.

Faire une thèse dans ce cadre (CIFRE) est très intéressant mais cela nécessite une organisation particulière. Dans le cadre d'un bureau d'études et des thèse CIFRE de manière générale il serait opportun d'adapter la durée et l'environnement de ces thèses.

PERSPECTIVES

Le développement des bases de données détaillées demande une mobilisation des différents acteurs car le suivi du confort et de la QAI nécessite un travail important. Il est, donc importante d'intégrer différents acteurs pour ces types de démarches. Un travail repartie et organisé va permettre d'être plus précis dans les résultats.

Le travail de modélisation réalisé dans la cadre de cette thèse, a été limité à deux semaines. Il est, donc nécessaire de continuer à étudier les variantes présentées sur des échelles plus longues. Cela permettra d'une part de valider nos résultats sur des périodes plus réalistes et de définir un ensemble de variantes.

Les stratégies de contrôle constituent un sujet qui n'a pas été abordé. Ce paramètre constitue un moyen d'optimisation, les résultats présentés ici peuvent être meilleurs. Une réduction de la demande énergétique et une amélioration de la QEI sont toujours possibles.

La ventilation naturelle est une stratégie qui mérite d'être étudiée. Nous avons observé qu'elle peut apporter des réponses intéressantes au niveau de la demande énergétique tout en améliorant l'indice QEI. La seule contrainte serait liée aux environnements extérieurs pollués, mais des solutions peuvent être étudiées.

Le mur Trombe, la double peau ou les fenêtres pariéto-dynamique sont des techniques peu utilisées en France, pourtant elles présentent d'énormes avantages notamment liées au couplage avec un mode de ventilation simple flux.

En fin, une analyse économique des solutions doit être faite afin de pouvoir définir leur pertinence. Cet aspect peut constituer un sujet de thèse intéressant et pertinent.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AEE, 2005. *Agence Européenne pour l'environnement*. [En ligne]
Available at: <http://www.eea.europa.eu/fr/pressroom/newsreleases/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-au-sein-de-12019union-europeenne-ont-diminue-en-2005>
- Afnor, 2004. *Panneaux a base de bois destines a la construction. Caracteristiques, evaluation de conformite et marquage*. s.l.:Afnor.
- AFNOR, 2014. *Association Française de Normalisation*. [En ligne]
Available at: <http://www.afnor.org/>
- AFSSET, 2009. *Procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration*, Maisons-Alfort: AFSSET.
- Allard, F., Dorier, V. & Feustel, H. E., 1990. *Fundamentals of the multizone air flow model - COMIS*, Brussels: AIVC.
- ANSES, 2014. *Étude du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur*, s.l.: s.n.
- Apte, M., Fisk, W. & Daisey, J., 2000. Associations between indoor CO2 concentrations and Sick Building Syndrome. *Indoor Air*, Volume 10, p. 12.
- AQMD, 2014. *South Coast Air Quality Management District*. [En ligne]
Available at: <http://www.aqmd.gov/>
- ASHRAE, 2010. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE, 2011. *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI Approved)*. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE, 2013. *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. s.l.:ASHRAE.
- ASPA, 2013. *Rapport relatif à la campagne de mesures de caractérisation des émissions de matériaux qui s'est déroulée du 10 au 12 septembre 2012 dans les locaux de la tour Elithis à Dijon*, Strasbourg: ASPA.
- Atmosph'air, 2013. *Bilan des prélèvements d'air intérieur et comparaison avec les concentrations relevées en air extérieur*, Dijon: Atmosph'air Bourgogne.
- Black, A., Coward, W., Cole, J. T. J. & Prentice, A., 1996. Human energy expenditure in affluent societies: an analysis of 575 doubly-labelled water measurements. *European Journal of Clinical Nutrition*, pp. 72-92.
- BREEAM, 2014. *UK Green Building Council*. [En ligne]
Available at: <http://www.breeam.org>
- Canada, G. d., 2008. *Statistique Canada*. [En ligne]
Available at: www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm
- Candas, V., 1998. *Le confort thermique*. Paris: Techniques de l'Ingénieur.
- CCHST, 2012. *Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail*. [En ligne].
- CEN, 2007. *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*. s.l.:AFNOR.
- CENERG, 2000. *Ecole de Mines de Paris*. [En ligne]
Available at: <http://www-cenerg.ensmp.fr/francais/themes/syst/html/cles.htm>
- CEQUAMI, 2014. *Certification Maisons Individuelles*. [En ligne]
Available at: <http://www.mamaisonneuecertifiee.com>
- CERQUAL, 2014. *Organisme certificateur des logements neufs et existants*. [En ligne]
Available at: <http://www.afnor.org/>

- CERTIVEA, 2014. *Organisme Certificateur des Bâtiments*. [En ligne]
Available at: <http://www.certivea.fr/>
- CETE, 2008. *Étude de la perméabilité à l'air des bâtiments hyper isolés*, s.l.: s.n.
- CIRC, 2004. *LE CIRC CLASSE LE FORMALDEHYDE COMME CANCEROGENE*, s.l.: s.n.
- CITEPA, 2012. *Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de l'Evolution de la Pollution Atmosphérique*. [En ligne]
Available at: http://www.citepa.org/fr/images/III-1_Rapports_Inventaires/ccnucc_france_2013_complet_sec.pdf
- Clements-Croome, D., 2000. *Creating the productive workplace*. New York: E&FN.
- Corgnati, S. P. & Gameiro da Silva, M., 2011. *Indoor Climate Quality Assessment*. Brussels: REHVA.
- Corgnati, S. P. et al., 2011. *Indoor Climate Quality Assessment*. Finland: REHVA.
- CRI, 2014. *Carpet and Rug Institute*. [En ligne]
Available at: <http://www.carpet-rug.org>
- CSTB, 2001. *Etude expérimentale des conditions de transfert de la pollution atmosphérique d'origine locale à l'intérieur des bâtiments d'habitation*, s.l.: CSTB.
- De Dear, R., Brager, G. & Cooper, D., 1998. *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*, Berkeley: ASHRAE.
- DOE, 2013. *EERE*. [En ligne]
Available at: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ep_interfaces.cfm
[Accès le Mars 2011].
- ECA, 2003. *Report 23: Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy*, Brussels: JRC.
- ECEEE, 2010. *European Council for an Energy Efficient Economy*. [En ligne]
Available at: http://www.eceee.org/buildings/EPBD_Recast
- EnergyPlus, 2013. *Energyplus Engineering reference*. California: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- EPBD, 2002. *Energy Performance of Buildings Directive*. [En ligne]
Available at: <http://www.epbd-ca.eu/>
- Fanger, P. O., 1973. *"Thermal comfort"*. New York: McGraw-Hill.
- Fanger, P. O., 1988. Introduction of the olf and decipol Units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. *Energy and Building*.
- Fang, L., Clausen, G. & Fanger, P., 1998. Impact of the temperature and humidity on perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures. *Indoor Air*, Volume 8, pp. 276-284.
- GIEC, 2013. *The Physical Sciences Basis*, s.l.: WHO; UNEP.
- Hänninen, O. & Asikainen, A., 2012. *Optimal ventilation : Balancing exposures in indoor and outdoor pollutants*, Tampere: National institute for Health and Welfare.
- Hatenberger, G., 2011. *Evaluation des facteurs solaires sur une maille de protection en Métal Déployé*, Dijon: ELITHIS.
- HCSP, 2009. *VALEURS REPERES D'AIDE A LA GESTION DE L'AIR DANS LES ESPACES CLOS - LE FORMALDEHYDE*, s.l.: s.n.
- Hernandez, O., 2011. Near Zero Energy Buildings. *REHVA*, 28 Mai, pp. 53-57.
- HQE, 2014. *Association Haute Qualité Environnementale*. [En ligne]
Available at: <http://assoHQE.org/HQE>
- IEA, 2010. *Task 40 - IEA*. [En ligne] Available at: <http://task40.iea-shc.org/> [Accès le 14 Juin 2013].

INRS, 2013. *Eclairage artificiel au poste de travail*, s.l.: INRS.

ISO, 1995. *Ergonomie des ambiances thermiques -- Évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs*. s.l.:ISO.

ISO, 2002. *ISO 7726. Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesure des grandeurs physiques*. s.l.:Afnor.

ISO, 2005. *Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*. s.l.:ISO.

ISO, 2007. *NF EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. s.l.:ISO.

Jarimska, M., Morawska, L. & Ensor, D., 2003. Effects of Ventilation and Filtration on Submicrometer Particles in an Indoor Environment. *Indoor Air*, 13(2), pp. 96-105.

Jorgensen, M. & Vestergaard, L., 1998. *Sensory characterization of emission from building materials. Selection of low-emitting materials and evaluation of the method*, Lyngby: Technical University of Denmark.

Klaus, A. K., Tull, R. H., Roots, L. M. & Pfafflin, J. R., 1970. *History of changing concepts of ventilation requirements*. s.l.:ASHRAE JOURNAL.

Koffi, J., 2009. *Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles*. La Rochelle: s.n.

Legislation, E., 2014. *Europa*. [En ligne]

Available at: www.europa.eu/legislation_summaries/environment/cooperation_with_third_countries/l28060_fr.html

Lenoir, A., C. S., Garde, F. & Donn, M., 2011. *USERS' BEHAVIOR AND ENERGY PERFORMANCES OF NET ZERO ENERGY*. s.l., 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney.

Levin, H., 1989. *Sick Building Syndrome - Review and exploration of causation hypotheses and control methods*. San Diego: IAQ89 The Human Equation.

Ling Liu, D. & Nazaroff, W., 2003. *Particle penetration through building cracks*. Berkeley: UC Berkeley Previously Published Works.

Lorsch, H. G. & Abdou, O. A., 1994. *The impact of the building indoor environment on occupant productivity*. s.l.:ASHRAE.

Lyon, C., 2011. *Etat de lieux des bâtiments tertiaires en France*, Lyon: CETE.

MEDDE, 2014. *Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie*. [En ligne]

Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Europe-un-portail-internet-pour.html>

Milton, D., G. P. & Walters, M., 2000. Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification and occupants complaints.

Mosqueron, L., Momas, I. & Le Moullec, Y., 2001. Personal exposure to fine particle in arisian office workers. *12th World Clean Air and Environment Séoul, Corée*, 59(8), pp. 550 - 555.

Moujalled, B., 2007. *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments ventilés naturellement*. Paris: Laboratoire de Sciences de l'Habitat de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

NATVENT, s.d. *Natural ventilation solutions to buildings in urban Areas*. [En ligne]

Available at: <http://projects.bre.co.uk/natvent/>

Observatory, N. M. L., 2013. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/news/7074.html>. [En ligne].

Officair, 2013. *Officair*. [En ligne]

Available at: <http://www.officair-project.eu/>

[Accès le Mai 2014].

OFT, 2013. *Rapport et avis d'experts sur l'e-cigarette*, s.l.: s.n.

- Persily, K. A., 1989. Ventilation rates in offices buildings. *IAQ 89 the Human Equation*.
- RFCI, 2014. *The Resilient Floor Covering Institute*. [En ligne]
Available at: <http://www.rfci.com/>
- Roulet, C. A., 2004. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Roulet, C. A. & Foradini, F., 2002. Simple and Cheap Air Change Rate Measurement Using CO2 Concentration Decays. *International Journal of Ventilation*, 1(1), pp. 39-44.
- Rowland, I. D. & Howe T. N., 2007. *Vitruvius. Ten books on Architecture*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sepänen, O., Fisk, W. & Lei, Q., 2006. *Effect of Temperature on Task Performance in Office Environment*, Berkeley: LBNL.
- Sepänen, O. & Wargocki, P., 2006. *Indoor Climate and Productivity in Offices*. s.l.:REHVA.
- Shaman, J. & Kohn, M., 2009. Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality.
- Smart, B., 2013. *ifcwiki.org*. [En ligne].
- Smith, P. N., 1988. Determination of ventilation rates in occupied buildings from metabolic CO2 concentrations and production rates. *Building and Environment*, 23(2), pp. 95-102.
- Sousa, S. I. V., Alvim-Ferraz, M. C. M. & Marti, F. G., 2008. Ozone exposure and its influence on the worsening of childhood asthma. 64(7).
- Spitz, C., 2012. *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*. Grenoble: s.n.
- Srinandini, P., Maddalena, R. L., Russell, M. L. & Apte, M. G., 2010. *EFFECT OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON FORMALDEHYDE*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Steven J. Hoff, P. a. J. D. H. P. P., 1994. *How Natural Ventilation Works*, IOWA: Department of Agricultural and Biosystems Engineering.
- Thellier, F., 1989. *Modélisation du comportement thermique de l'homme et son habitat*. Toulouse: Université Paul Sabatier.
- USGBC, 2014. *United States Green Building Council*. [En ligne]
Available at: <http://www.usgbc.org/DisplayPage.aspx?CMSPageID=1988>
- Wargocki, P., 2003. *Estimate of an economic benefit from investment in improved indoor air quality in an office building*. Singapore: University of Singapore, Department of Buildings.
- Wargocki, P. et al., 2006. Indoor air quality effects on office work. Dans: *Creating the Productive Environment*. Finland: REHVA.
- Wargocki, P. et al., 2006. *INDOOR CLIMATE AND PRODUCTIVITY IN OFFICES*. s.l.:REHVA.
- Wargocki, P. & Wyon, D., 2006. Room temperature effects on office work. Dans: *Creating the Productive Environment*. s.l.:s.n.
- Wargocki, P., Wyon, D. & Fanger, P. O., 2000. Productivity is affected by the air quality in offices. 1(635-640).
- WHO, 2000. *The right to healthy indoor air*, Netherlands: WHO.
- WHO, 2001. *The Formaldehyde*, s.l.: s.n.
- Wikipedia, s.d. http://fr.wikipedia.org/wiki/Double_vitrage. [En ligne].
- Wittczak, T., Walusiak, J. & Palcynski, C., 2001. *Sick building syndrome a new problem of occupational medicine*. s.l.:s.n.

Wyon, 1996. Indoor environmental effects on productivity. *Proceedings of IAQ'96 Paths to Better Buildings Environments*.

Wyon & Wargocki, 2013. How indoor environment affects performance. *ASHRAE JOURNAL*, pp. 46-52.

ANNEXES

1. ANNEXE 1 - ENQUÊTE CONFORT THERMIQUE – PERIODE HIVER

Sondage Confort Hygrothermique Tour Elithis

1. Informations de base

* 1. Quel est votre sexe?

* 2. Quelle est votre tranche d'âge?

* 3. A quel niveau travaillez-vous?

* 4. Quel est votre emplacement par rapport à l'extérieur?

* 5. Quel est votre emplacement par rapport à l'intérieur?

* 6. Quel est votre tenue vestimentaire?

Haut Bas Chaussures Chaussettes

Autre tenue (veuillez préciser)

2. Confort thermique

* 1. Quelle était votre activité avant de répondre cette enquête ?

* 2. Comment percevez-vous la température ambiante à ce moment précis?

* 3. Trouvez-vous cela?

* 4. Comment ressentez-vous l'humidité ambiante ?

* 5. Trouvez-vous cela?

Sondage Confort Hygrothermique Tour Elithis

* 6. Ressentez-vous un courant d'air....

	Devant	Dernière	Gauche	Droite	Haut	Bas	Pas du tout
Froid?	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Chaud?	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

7. Ressentez-vous une autre sensation d'inconfort?

☐ Oui
☐ Non

Veuillez préciser, si c'est le cas:

3. Qualité de l'air intérieur

* 1. Ressentez-vous des odeurs inhabituelles?

☐ Oui
☐ Non

* 2. Comment caractérisez-vous les odeurs que vous percevez ? (Choix multiple)

<input type="checkbox"/> Aucune odeur	<input type="checkbox"/> Produit de nettoyage
<input type="checkbox"/> Odeur corporelle	<input type="checkbox"/> Nourriture
<input type="checkbox"/> Humid	<input type="checkbox"/> Plastique
<input type="checkbox"/> renfermé	<input type="checkbox"/> Fumée de cigarette
<input type="checkbox"/> Parfum	
<input type="checkbox"/> Autre (veuillez préciser)	

* 3. Ressentez-vous une irritation des yeux, gorge ou du nez?

☐ Oui
☐ Non

* 4. Ressentez-vous une sensation de fatigue?

☐ Beaucoup ☐ Un peu ☐ Rien du tout

Sondage Confort Hygrothermique Tour Eliithis

* 5. En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?

- ☐ Extrêmement bonne
- ☐ Très bonne
- ☐ Bonne
- ☐ Légèrement Mauvaise
- ☐ Mauvaise
- ☐ Très mauvaise
- ☐ Extrêmement Mauvaise

4. Qualité de l'environnement intérieur

1. Comment évaluez-vous le niveau d'éclairage actuellement? (Facultatif)

2. Vous sentez-vous ébloui par la lumière actuellement? (Facultatif)

- ☐ Beaucoup
- ☐ Un peu
- ☐ Rien du tout

3. Percevez-vous un ou des bruits gênants? (Facultatif)

	Très gênant	Gênant	Peu gênant	Pas du tout gênant
Voix	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Serveur	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trafic	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Téléphone	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Imprimante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Photocopieur	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Conversation téléphonique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autre 1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autre 2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autre 3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Autre (veuillez préciser) :

Sondage Confort Hygrothermique Tour Eliithis

* 4. En terme générale l'ambiance intérieure vous paraît?

- ☐ Extrêmement confortable
- ☐ Très confortable
- ☐ Légèrement confortable
- ☐ Confortable
- ☐ Inconfortable
- ☐ Légèrement inconfortable
- ☐ Très inconfortable
- ☐ Extrêmement inconfortable

Commentaire libre sur l'ambiance :

2. ANNEXE 2 - ENQUÊTE CONFORT THERMIQUE – PÉRIODE HIVER

Sondage Confort Hygrothermique Tour Elithis

1. Informations de base

1. Quel est votre sexe?

2. A quel niveau travaillez-vous?

3. Quel est votre tenue vestimentaire?

Haut Bas Chaussures Chaussures

Autre tenue (veuillez préciser)

2. Confort thermique

1. Quelle était votre activité avant de répondre cette enquête ?

2. Comment percevez-vous la température ambiante à ce moment précis?

☐ Chaud ☐ Neutre ☐ Froid

☐ Autre (veuillez préciser)

3. Trouvez-vous cela?

☐ Confortable ☐ Inconfortable

4. Comment ressentez-vous l'humidité ambiante ?

☐ Séche ☐ Neutre ☐ Humide

☐ Autre (veuillez préciser)

Sondage Confort Hygrothermique Tour Elithis

5. Trouvez-vous cela?

☐ Confortable ☐ Inconfortable

6. Ressentez-vous un courant d'air....

Froid? ☐ Devant ☐ Derrière ☐ Gauche ☐ Droite ☐ Haut ☐ Bas ☐ Pas du tout ☐

7. Trouvez-vous cela?

☐ Confortable ☐ Inconfortable

Commentaire

8. Ressentez-vous un courant d'air....

Chaud? ☐ Devant ☐ Derrière ☐ Gauche ☐ Droite ☐ Haut ☐ Bas ☐ Pas du tout ☐

9. Trouvez-vous cela?

☐ Confortable ☐ Inconfortable

Commentaire

10. Ressentez-vous une autre sensation d'inconfort?

☐ Oui ☐ Non

Veuillez préciser, si c'est le cas:

3. Qualité de l'air intérieur

1. Ressentez-vous des odeurs inhabituelles?

☐ Oui ☐ Non

Sondage Confort Hygrothermique Tour Eliithis

2. Pouvez-vous le(s) décrire ? (Choix multiple)

- ☐ Aigreurs/odeur ☐ renfermé ☐ Nourriture
☐ Odeur corporelle ☐ Parfum ☐ Plastique
☐ Neuf ☐ Produit de nettoyage ☐ Fumée de cigarette
☐ Autre (veuillez préciser)

3. Ressentez-vous des irritations au niveau de....? (Choix multiple)

- ☐ Nez ☐ Gorge ☐ Yeux ☐ Pas du tout

Autre (veuillez préciser)

4. Ressentez-vous un ou plusieurs de ces symptômes? (choix multiple)

- ☐ Manque de concentration ☐ Maux de tête ☐ Etouffement ☐ Fatigue ☐ Aucun

Autre (veuillez préciser)

5. En termes généraux la qualité de l'air vous paraît?

- ☐ Bonne ☐ Acceptable ☐ Mauvaise

Autre (veuillez préciser)

4. Qualité de l'environnement intérieur

1. Comment évaluez-vous le niveau d'éclairage actuellement? (Facultatif)

- ☐ Elevé
☐ Acceptable
☐ Faible

Sondage Confort Hygrothermique Tour Eliithis

2. Le bruit de la ventilation vous paraît... (Facultatif)

- ☐ Elevé
☐ Acceptable
☐ Faible

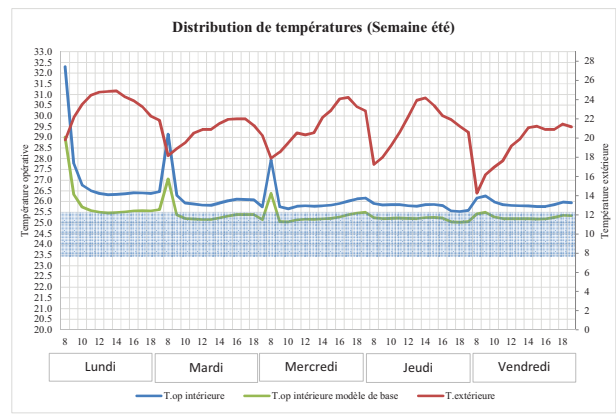
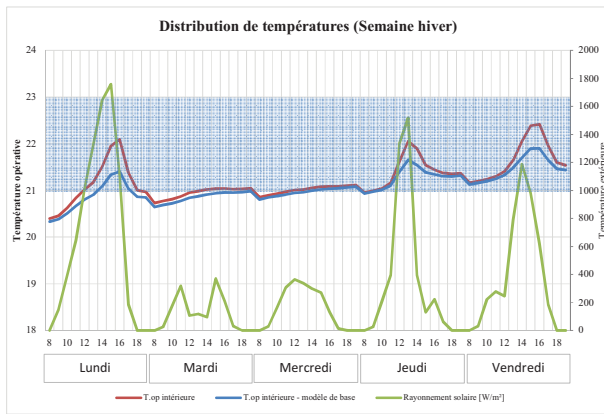
Accepteriez-vous un bruit plus élevé pour une diffusion d'air plus importante? (oui, non, pourquoi...)

3. D'une façon générale (température, qualité d'air, lumière, etc....) l'ambiance intérieure vous paraît?

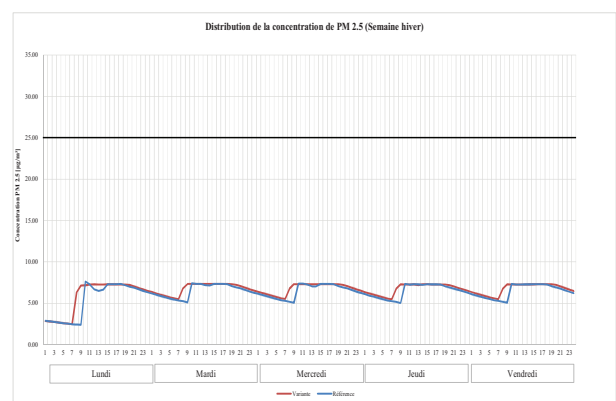
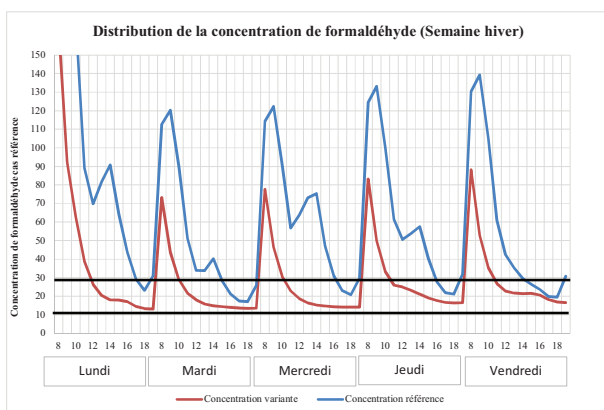
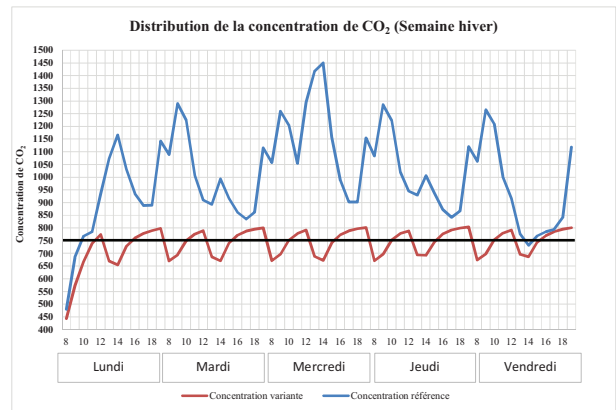
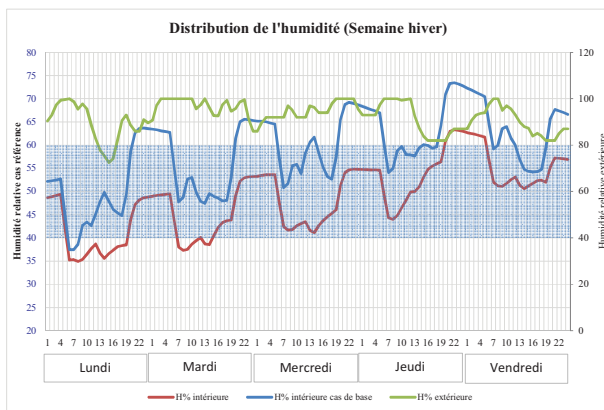
- ☐ Confortable ☐ Légèrement inconfortable ☐ Inconfortable

Commentaire libre sur l'ambiance :

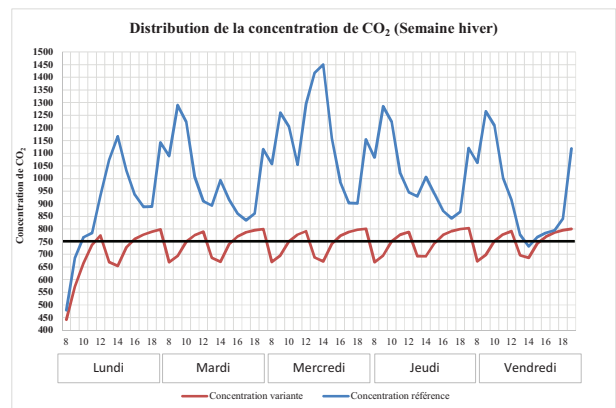
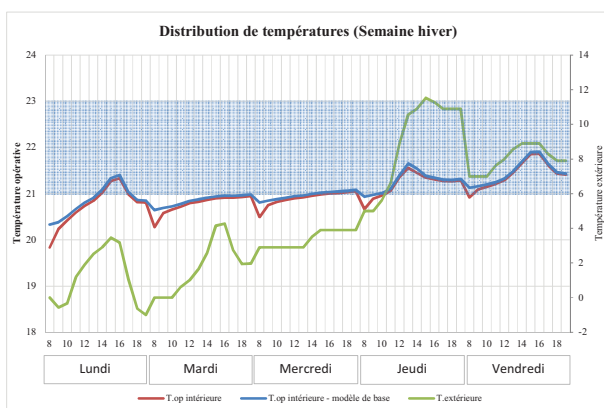
3. ANNEXE 3 – DÉTAIL VARIANTE 1 - VITRAGE

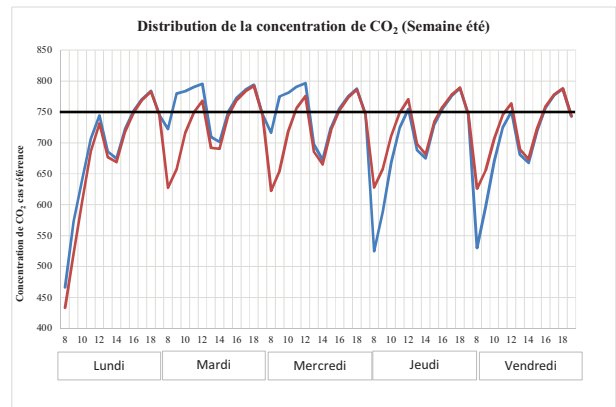
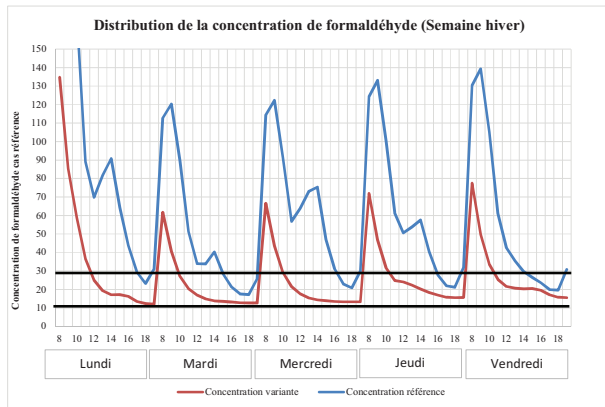


Annexe 4 – Détail variante 2 - recyclage

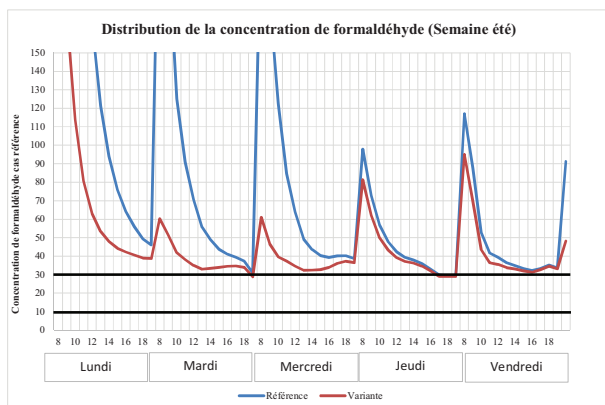
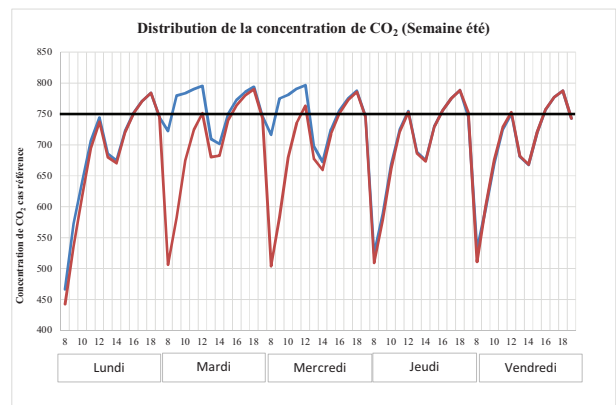
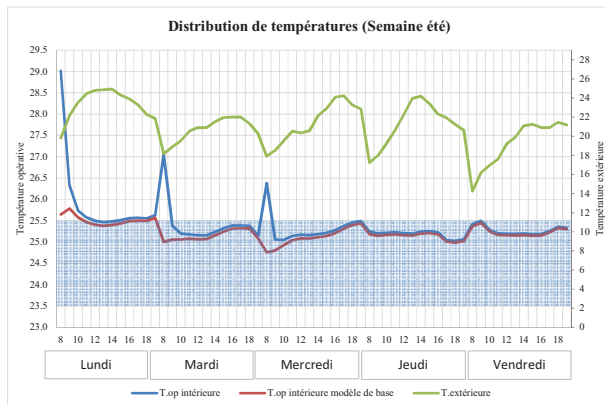
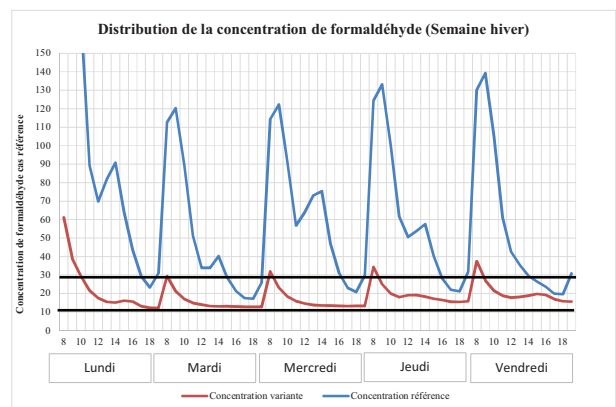
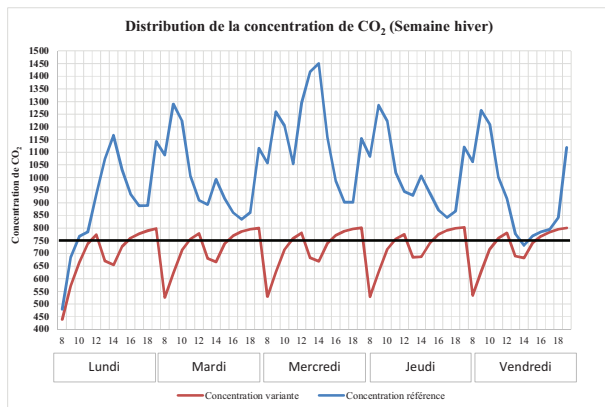


Annexe 5 – Détail variante 3 – Ventilation 7-19h

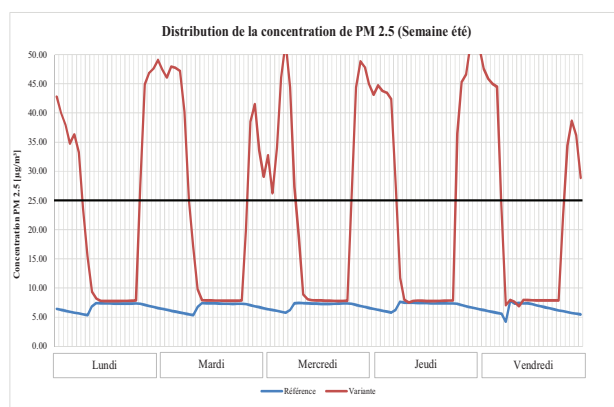
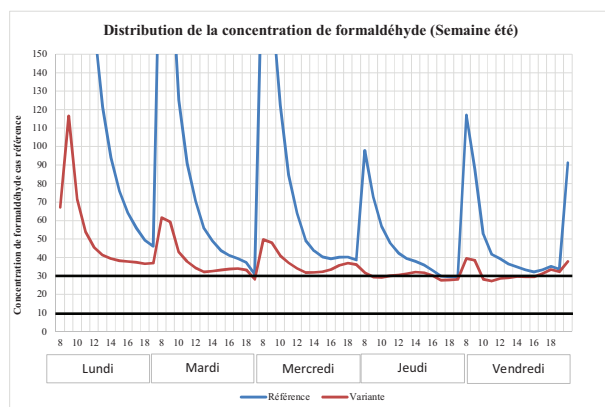
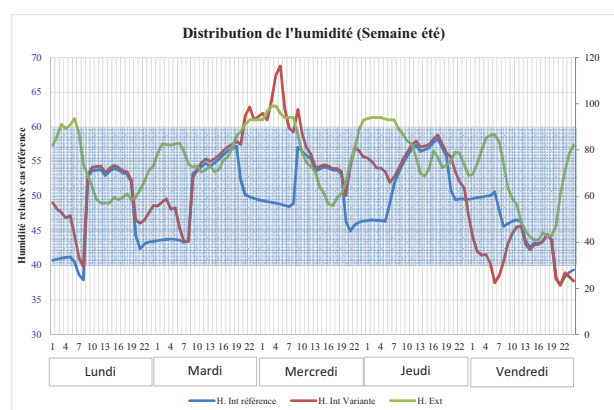
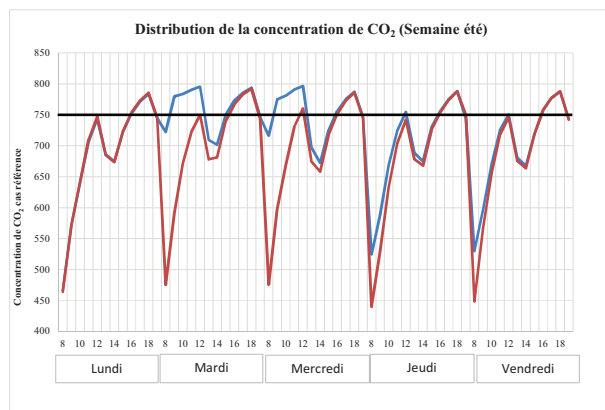
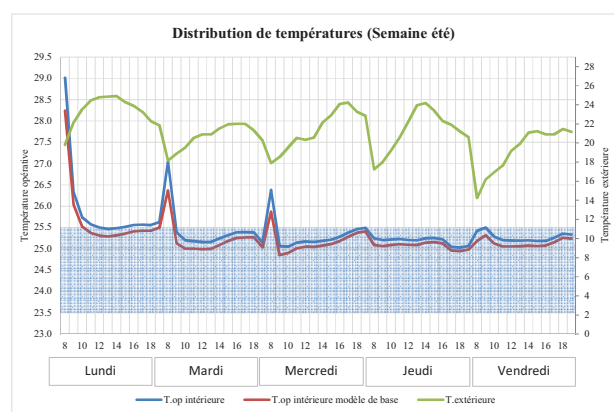
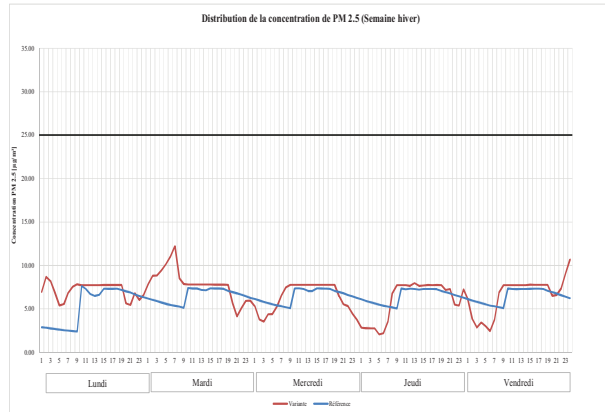
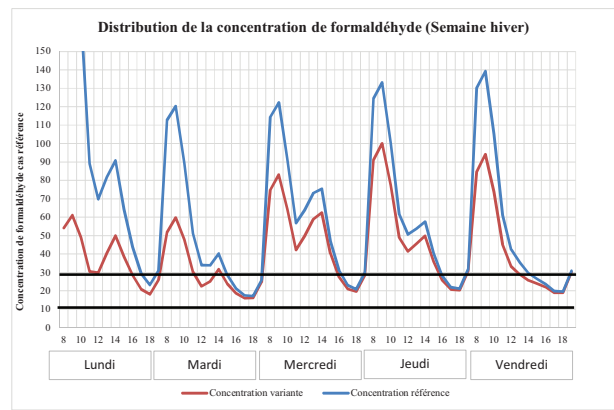
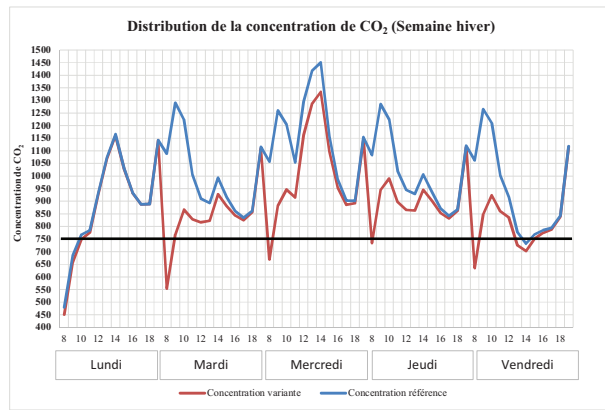




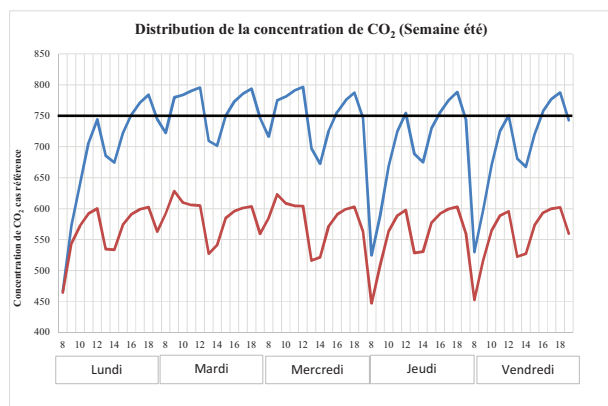
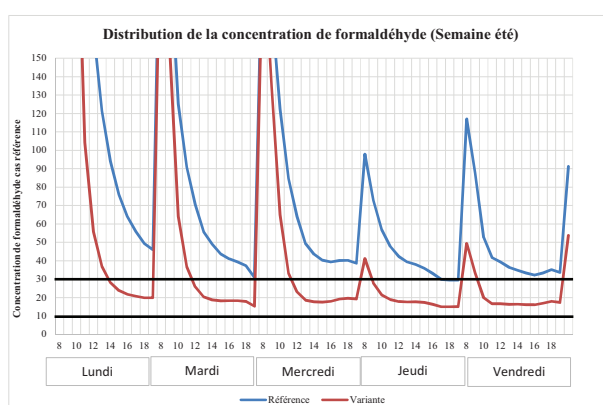
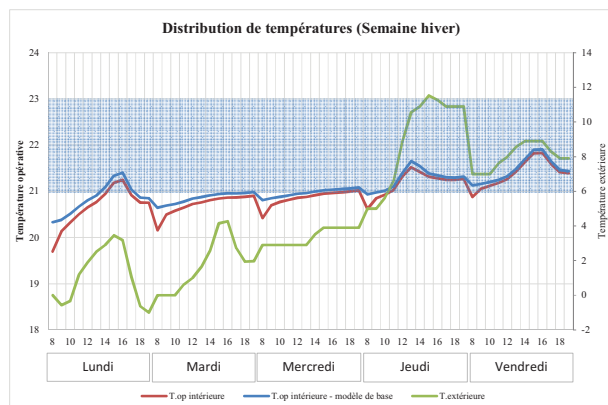
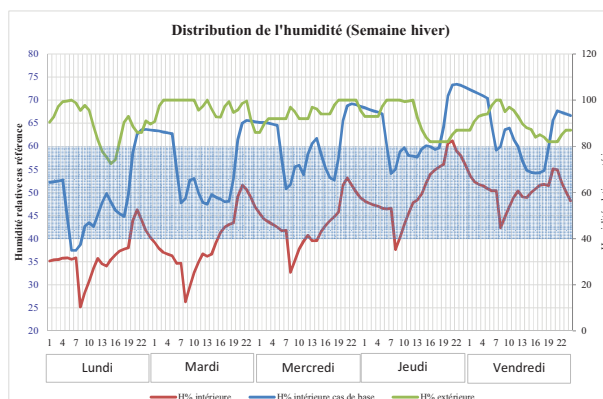
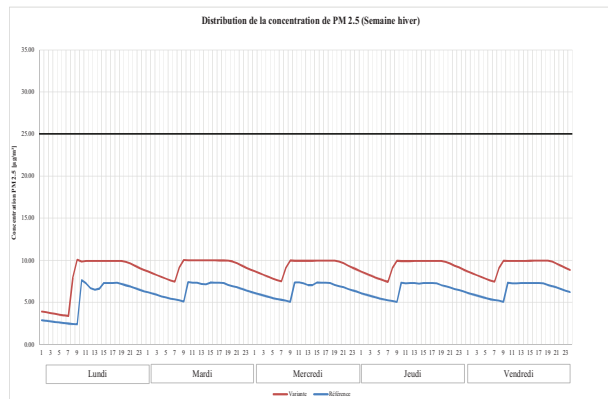
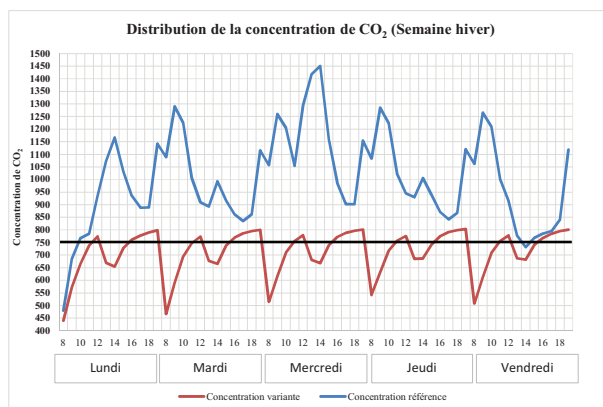
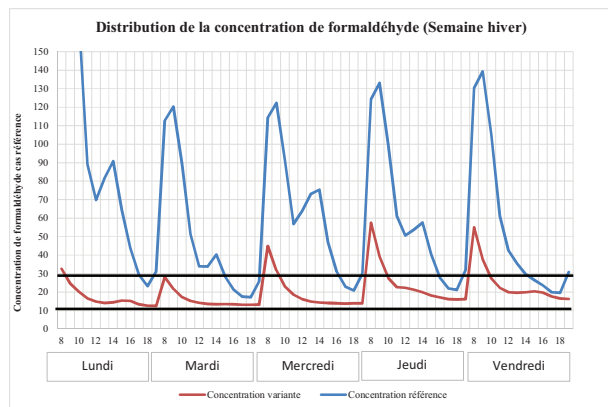
4. ANNEXE 6 – DÉTAIL VARIANTE 4 – VENTILATION 5-19H



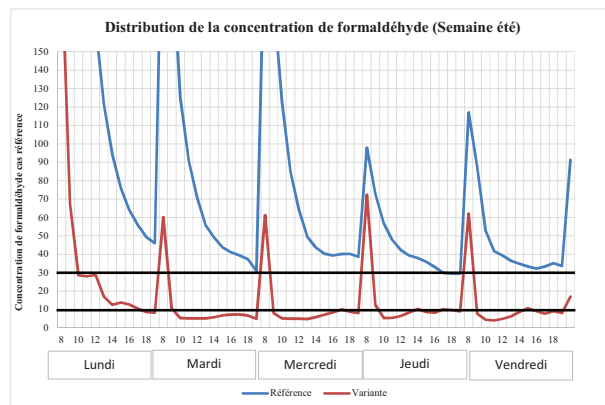
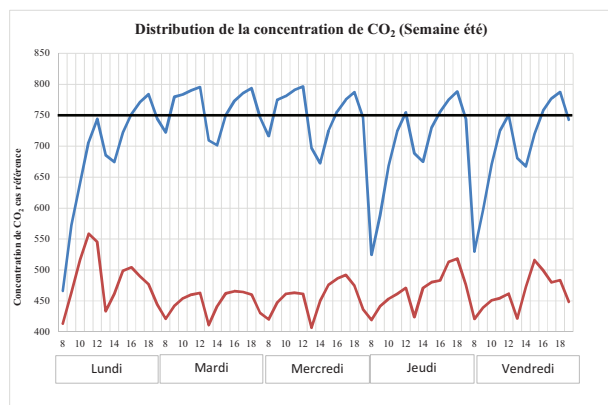
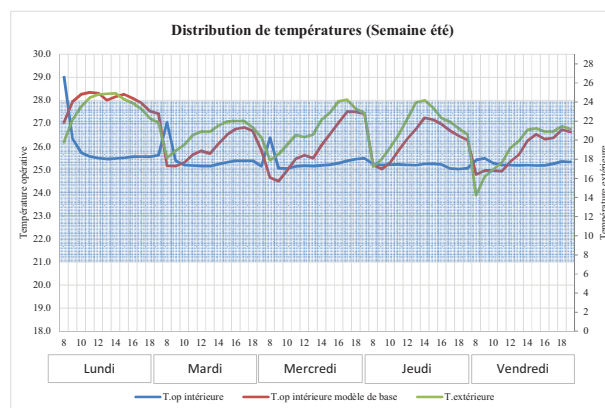
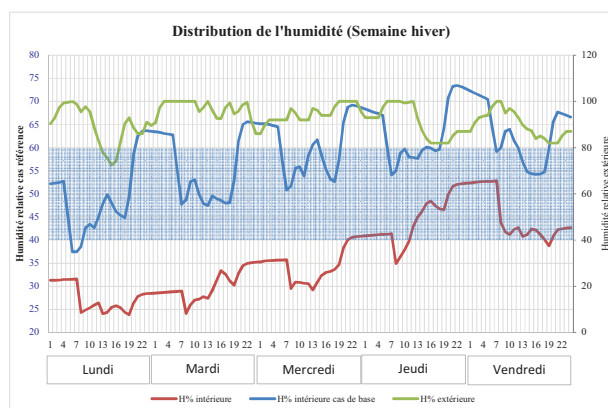
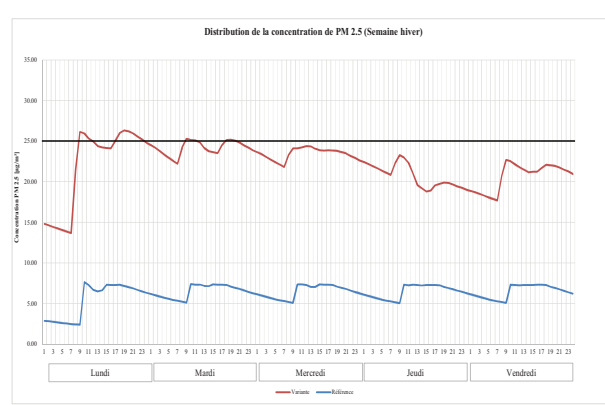
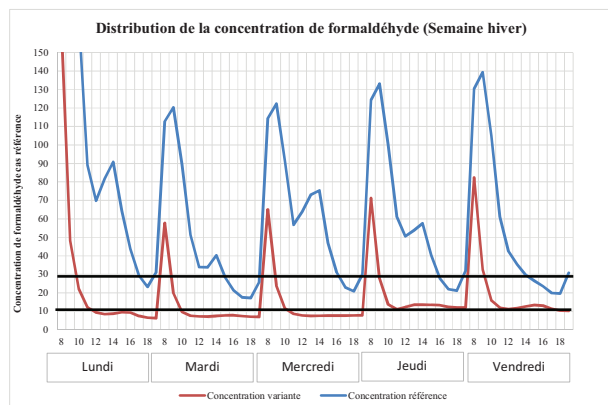
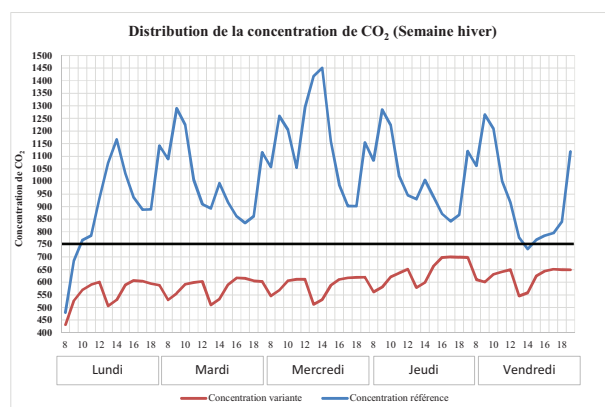
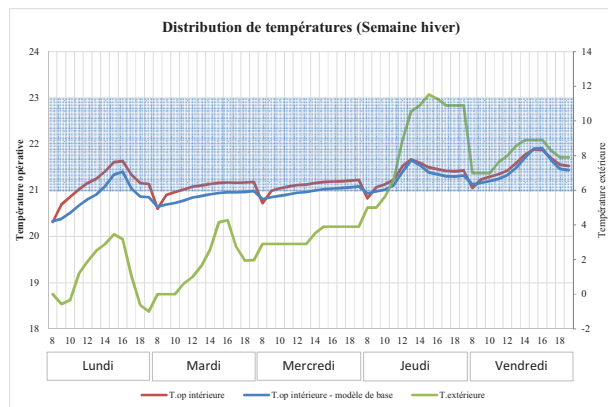
5. ANNEXE 7 – DÉTAIL VARIANTE 5 – VENTILATION NOCTURNE

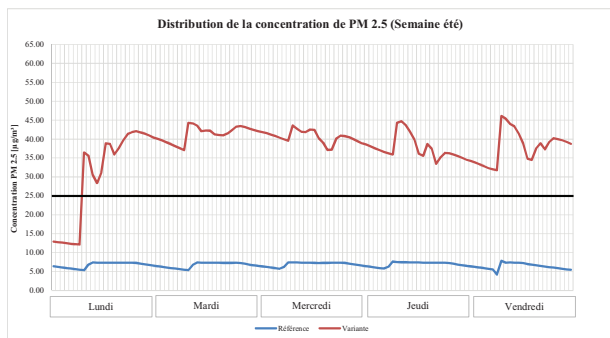


6. ANNEXE 8 – DÉTAIL VARIANTE 6 – MODULATION DES DÉBITS

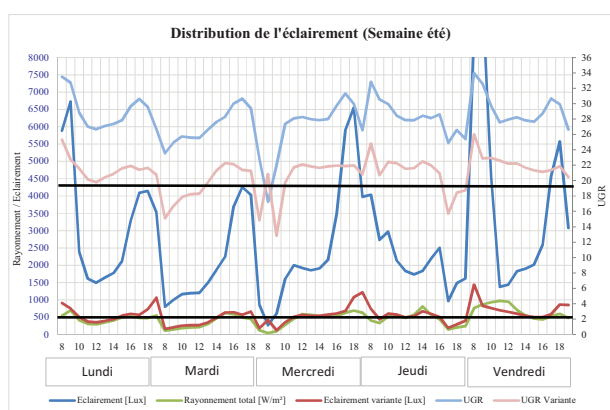
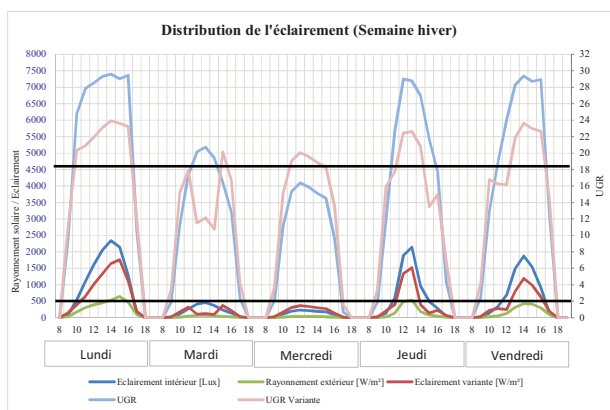


7. ANNEXE 9 – DÉTAIL VARIANTE 7 – VENTILATION NATURELLE

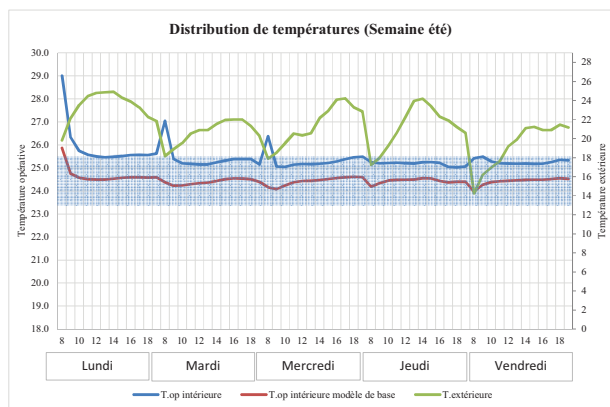
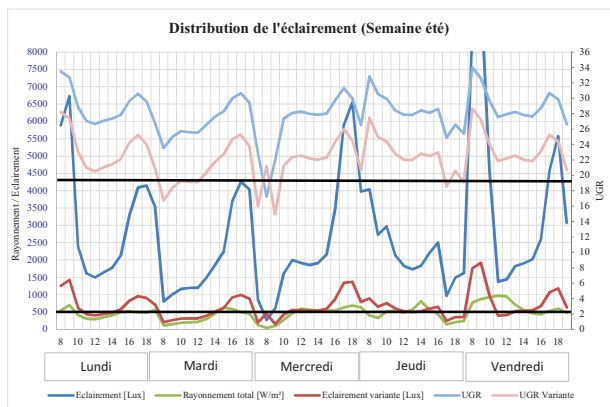
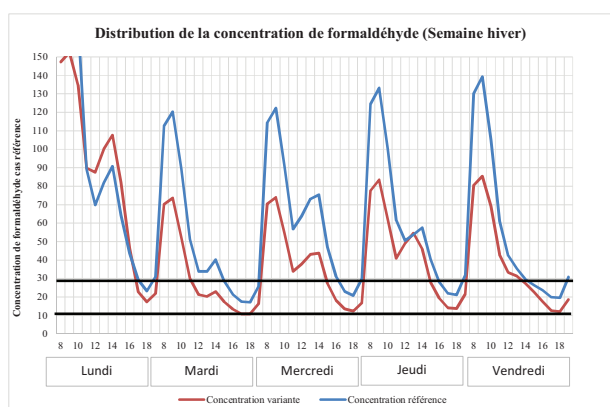
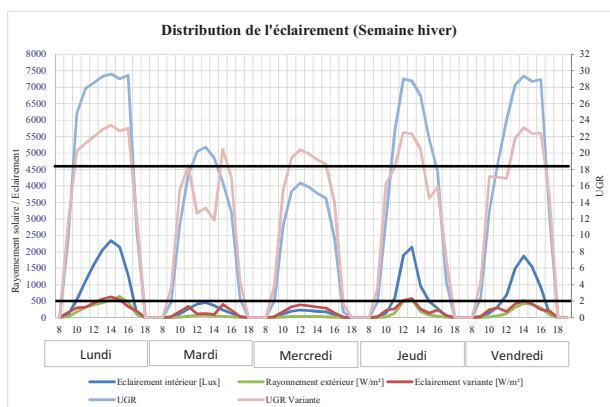




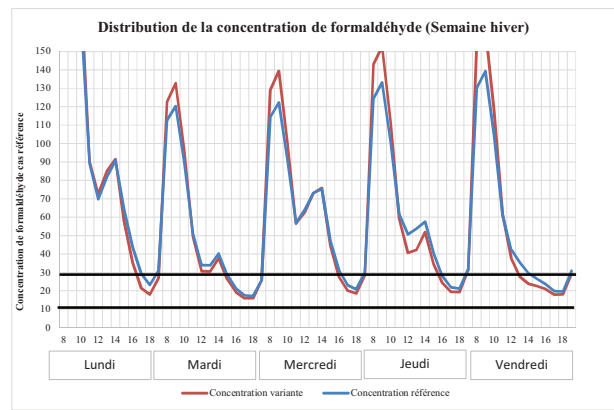
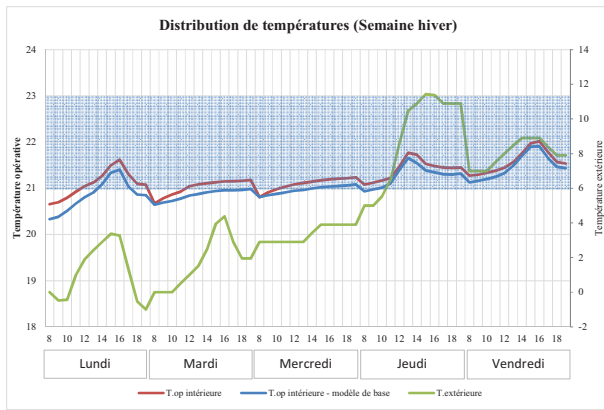
8. ANNEXE 10 – DÉTAIL VARIANTE 8 – BRISES SOLEIL ORIENTABLES



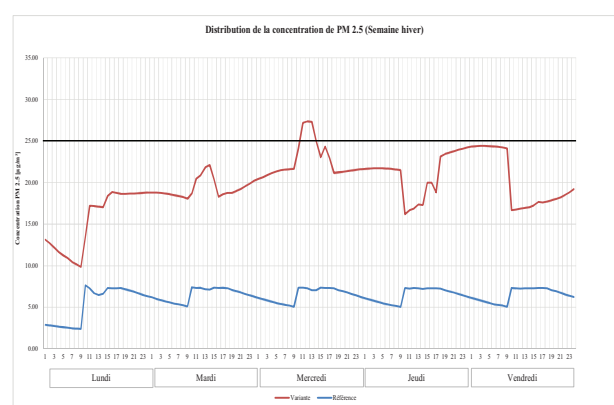
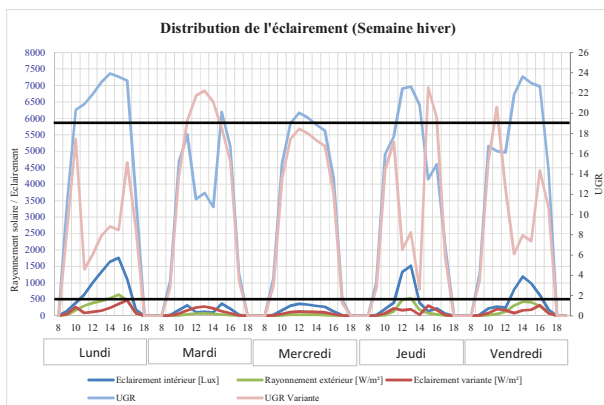
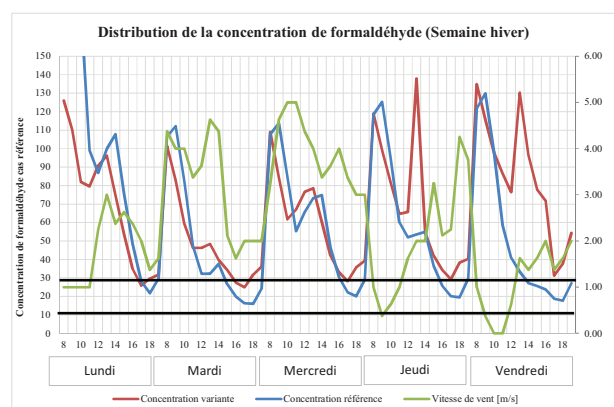
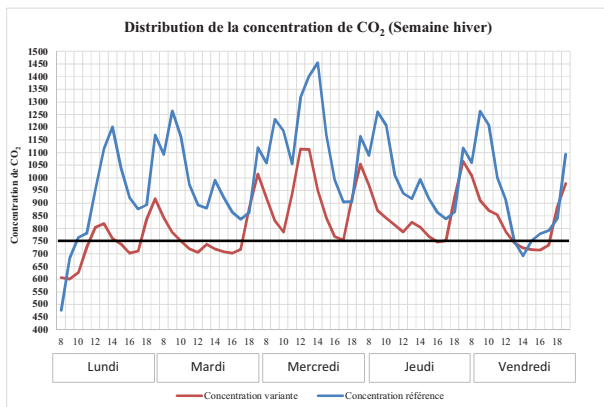
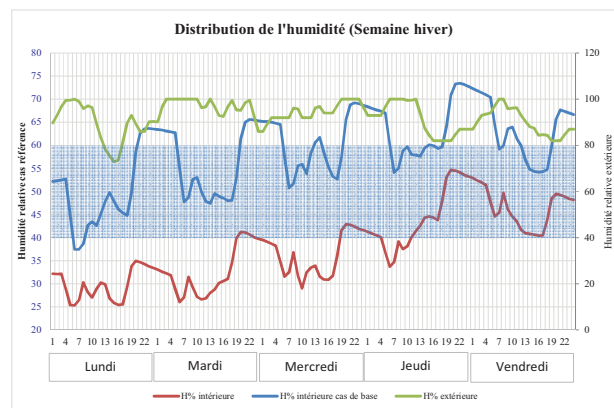
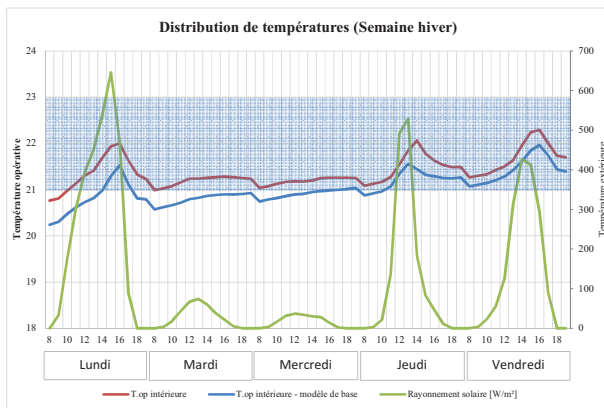
Annexe 11 – Détail variante 9 – Vitrage Electrochrome

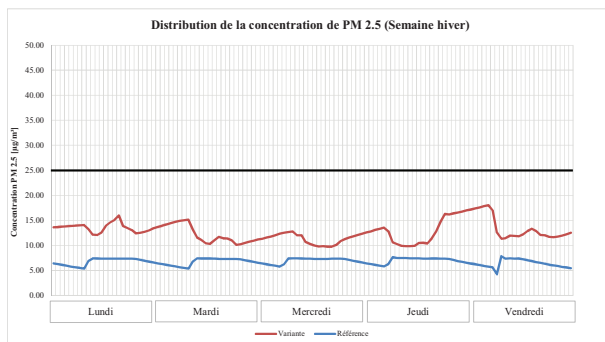
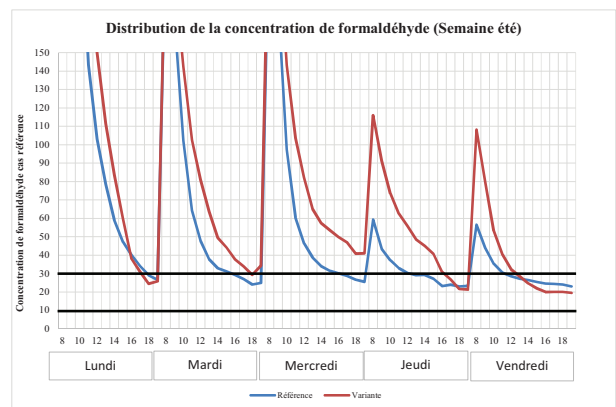
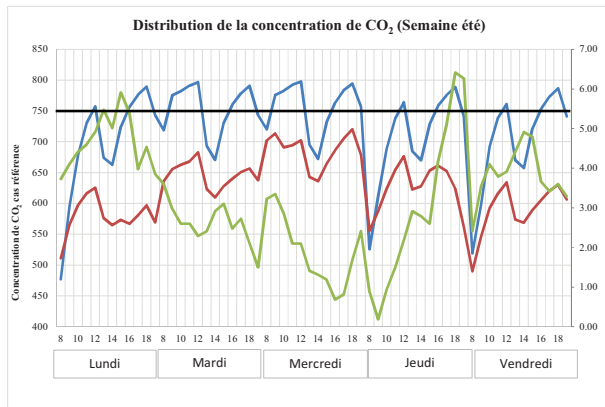


9. ANNEXE 12 – DÉTAIL VARIANTE 10 – INERTIE

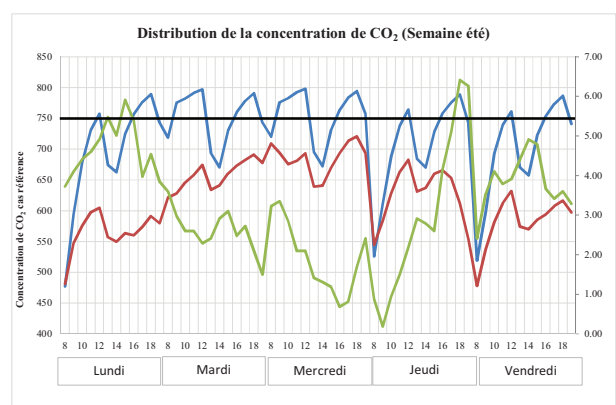
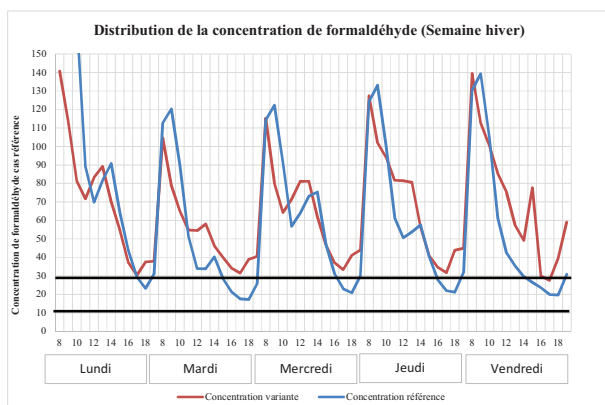
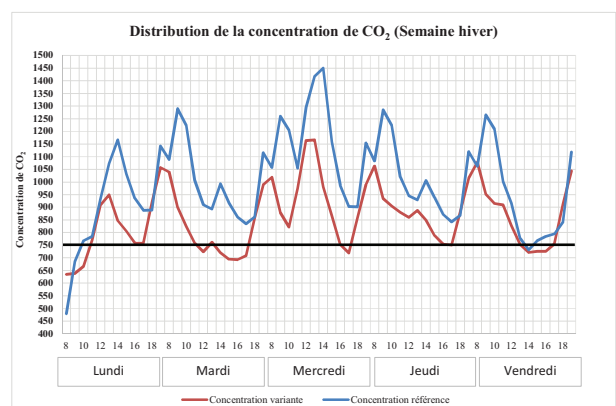
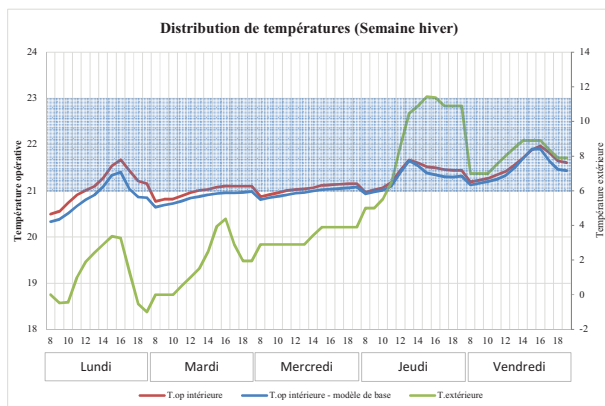


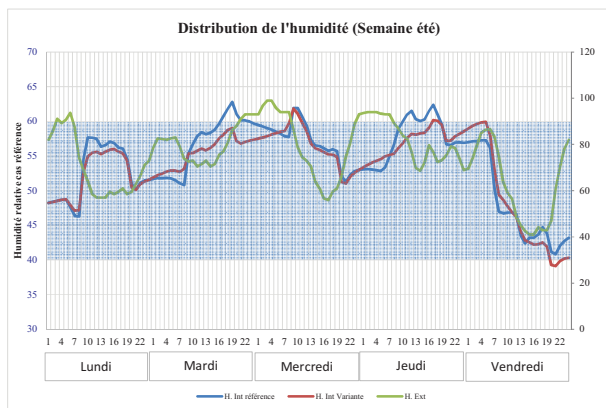
10. ANNEXE – 13 – DÉTAIL VARIANTE 13 – DOUBLE PEAU



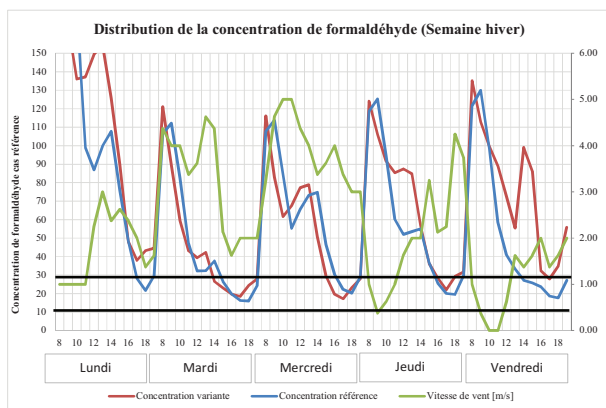
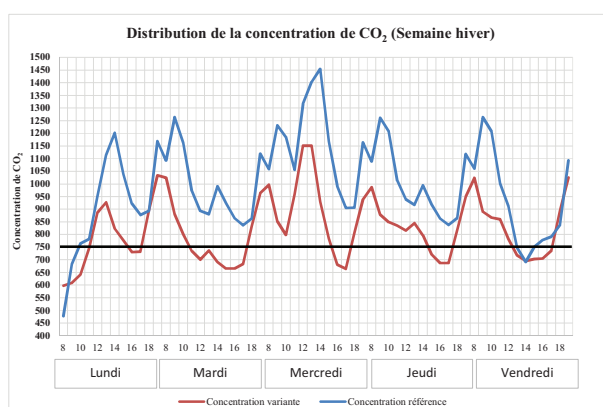
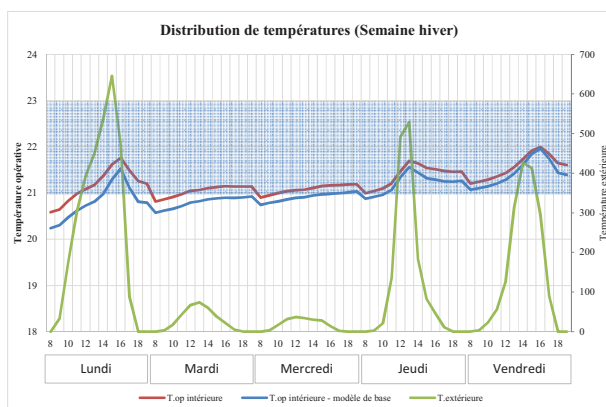


11. ANNEXE 14 – DÉTAIL VARIANTE 14 – MUR TROMBE





12. ANNEXE 15 – DÉTAIL VARIANTE 15 – MUR TROMBE ACTIF



13. ANNEXE 16 – DÉTAIL VARIANTE 16 – FENÊTRE PARIETODYNAMIQUE

